



Universidade de Aveiro
2014

Departamento de Engenharia Mecânica

João Pedro Gaio
Ferrinho

Conceção de sistema de controlo multifunção para um
túnel de vento



**João Pedro Gaio
Ferrinho**

**Conceção de sistema de controlo multifunção para um
túnel de vento**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Automação Industrial, realizada sob orientação científica do Doutor José Paulo Oliveira Santos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Doutor Carlos Alberto Diogo Soares Borrego, Professor Catedrático do Departamento de Ambiente e Ordenamento.

O presente trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto CLICURB (EXCL/AAG-MAA/0383/2012).

O júri

Presidente

Professor Doutor Pedro Nicolau Faria da Fonseca
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais

Professor Doutor Manuel Bernardo Salvador Cunha
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Professor Doutor José Paulo Oliveira Santos
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

Agradecimentos

Uma tese pela sua finalidade académica é um trabalho individual, no entanto não posso deixar de referir os valiosos contributos que me foram dados ao longo do meu trabalho e que me permitiram chegar a este ponto. Por essa razão, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

Ao Doutor José Paulo Oliveira Santos, meu orientador, pela competência científica e acompanhamento do trabalho, pela sua disponibilidade durante a minha tese, assim como pelas críticas, correções e sugestões relevantes feitas durante a orientação.

Ao Doutor Carlos Alberto Diogo Soares Borrego, meu co-orientador, por me colocar o desafio de fazer esta tese de mestrado, pela competência científica e orientação dada, e que me ensinou com prazer e dedicação parte do que sei sobre o túnel de vento, bem como pela disponibilidade então demonstrada.

Ao Mestre Engenheiro Sylvio de Freitas, pelo incansável apoio moral, orientação e permanente disponibilidade, tendo permitido que encontrasse informações, respostas e soluções que em muito contribuíram para a execução desta tese.

Ao Nuno Costa, Assistente Operacional, pela valiosa ajuda na parte prática do túnel, tendo contribuído de forma substancial para a realização desta tese.

À minha Família pelo apoio sempre demonstrado, pelas proveitosas conversas e conselhos transmitidos.

À Carla, a minha namorada que me acompanhou sempre com entusiasmo, dando-me força para continuar o meu trabalho.

Aos meus colegas de mestrado pelo espírito de camaradagem e pelo diálogo construtivo que sempre existiu durante o nosso trabalho no Laboratório de Sistema Flexível de Produção.

Agradeço às seguintes Instituições pelo apoio, excelentes condições de trabalho que me proporcionaram e colaboração prestada, sem a qual não seria possível a concretização do trabalho de mestrado:

Universidade de Aveiro;

Departamento de Engenharia Mecânica;

Departamento de Ambiente e Ordenamento;

Fundação para a Ciência e a Tecnologia;

Projeto CLICURB (EXCL/AAG-MAA/0383/2012)

Mais uma vez, a todos os meus sinceros agradecimentos.

Palavras-Chave

Túnel de vento, Autómato, Microcontrolador, Motor de Passo, Controlo remoto

Resumo

A presente dissertação descreve o desenvolvimento de um sistema capaz de controlar o posicionador interno, o posicionador externo e o variador de frequência do túnel de vento do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. Este sistema tem como principal característica a capacidade de auxiliar o utilizador do presente túnel de vento na sua utilização, auxiliando o mesmo nos processos de medição e posicionamento de sondas, bem como o controlo das velocidades dos escoamentos.

O trabalho desenvolvido envolve a reativação do posicionador interno do túnel, o dimensionamento e a implementação de um eixo superior, o controlo do variador de frequência bem como a substituição do manómetro por um sensor elétrico de pressão.

O sistema tem por base um autómato que recebe ordens via Ethernet de uma aplicação instalada num computador. A partir da aplicação gráfica é possível controlar todo o sistema, desde os posicionadores ao variador de frequência, bem como registar resultados obtidos pelo sistema. Esta permite também importar, através de ficheiro CSV, uma lista de posições a usar no sistema. Isto de modo a permitir ao utilizador planear antecipadamente as experiências a realizar por intermédio da definição prévia dos pontos desejados para o registo das grandezas a medir. Foi também adicionada a opção de controlar o posicionador interno manualmente através de um *joystick* com o intuito de auxiliar o utilizador na manipulação do sistema.

Antes do dimensionamento dos sistemas acima referidos, é fundamental possuir bons conhecimentos do funcionamento dos equipamentos de medição, pelo que a dissertação inclui também um estudo abrangente das tecnologias usadas no túnel de vento, com a verificação dos requisitos para sua integração com os novos sistemas. Com vista a averiguar a eficácia do dimensionamento dos sistemas após sua implementação, alguns testes são realizados antes de, nas conclusões, serem apresentadas futuras melhorias ao túnel de vento.

Keywords

Wind Tunnel, Automaton, Microcontroller, Step Motor, Remote control

Abstract

The following thesis describes the conception of a system that is able to control the internal axis, the external axis and a variable-frequency drive from Department of the Environment and Planning's main wind tunnel at Aveiro University. The system's main characteristic is the ability to assist the wind tunnel user in positioning the measurement probes and controlling the flow speed.

The work starts by reactivating the internal positioning axis of the wind tunnel, followed by the scaling and the implementation of the external axis and the control of the power inverter, but also the replacement of the manometer for an electrical pressure sensor.

The system is based on automaton and receives its information from a graphical application, installed in a computer, via Ethernet.

The application is able to control the full system, from the axis' to the power inverter, but also to record all the results that the system is able to collect. It allows the user to import the positions that will be used in the experiment from a CSV file, thus allowing the user to plan ahead. A joystick was also added to the system as a means to enable the user to manually place the probe more accurately in the wind tunnel.

Before embarking on the tasks described above, it is important to have a good knowledge of the measuring systems employed. Therefore, there is a requirement to review and acquire information about some of the probes used in the wind tunnel to measure the flow. To this effect, this thesis includes a brief study regarding the technologies used and the requirements and rationale of each to be integrated in the work.

In order to evaluate if the work is well done, some tests are performed on the system in the end. Finally suggestions for future developments are reserved for the conclusion.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contexto.....	1
1.2	Problemas a resolver e sua importância.....	2
1.3	Objetivos	2
1.4	Organização da tese	3
2	Estado de arte	5
2.1	Conceitos.....	5
2.2	Tecnologias.....	5
2.3	Soluções científicas e acadêmicas propostas por outros.....	10
2.3.1	Artigo - Design, Sensing, and Control of a Scaled Wind Tunnel for Atmospheric Display 10	
2.3.2	Tese 1 - Infraestruturas eólicas: módulo autónomo de monitorização.....	11
2.3.3	Tese 2 - Desenvolvimento de um indexer para comando XY de dois motores passo-a-passo.....	12
2.4	Soluções comerciais atuais	13
2.5	Situação inicial.....	13
3	Proposta de uma nova solução	15
3.1	Levantamento do material/Proposta	15
3.2	Etapas do trabalho.....	18
4	Implementação da solução proposta	19
4.1	<i>Hardware</i>	23
4.2	Sistema de Posicionamento Interno.....	24
4.3	Sistema de Posicionamento Externo	31
4.4	Variador de Frequência.....	34
4.5	Aplicação Gráfica	41
4.6	Resultados Finais	45

5	Conclusões e trabalho futuro	53
5.1	Conclusão.....	53
5.2	Trabalho futuro	54
6	Referências	55
7	Anexos.....	57
	Anexo A – Aplicação Gráfica	57
	Anexo B – Esquema elétrico	60

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Desenho do túnel de vento.....	5
Figura 2.2 - Esquema interno de um tubo de Pitot (The Engineering ToolBox, 2014)	6
Figura 2.3 - Esquemático de um sensor térmico de escoamento (Sensorion, 2014)	7
Figura 2.4 - Estrutura da mensagem Modbus(Santos, 2010)	9
Figura 2.5 - a) Módulo Autónomo de Monitorização b) Teste Prático de Autonomia (Pereira, 2010)	11
Figura 2.6 - Unidade de demonstração de produção flexível (Pinto, 2011).....	12
Figura 3.1 - Ilustração dos movimentos possíveis no eixo interno.....	15
Figura 3.2 - Posicionamento dos sensores no eixo Y e Z do túnel de vento	16
Figura 3.3 - Posicionamento dos sensores/motor do eixo X no túnel de vento	16
Figura 3.4 - Ventilador e variador do túnel de vento.....	17
Figura 3.5 - Diagrama da proposta do autor	17
Figura 4.1 - Esquema da proposta	19
Figura 4.2 - Joystick.....	20
Figura 4.3 - Drive existente no túnel de vento	22
Figura 4.4 - Informação recebida do Microcontrolador.....	26
Figura 4.5 - Esquema de ligações do microcontrolador.....	27
Figura 4.6 - Esquema da leitura/envio da informação do joystick	28
Figura 4.7 - Aplicação do controlo do eixo interior	29
Figura 4.8 - Tabela de configuração dos parâmetros do motor	30
Figura 4.9 - Tabela usada pela função HSPSO	30
Figura 4.10 - Eixo Superior	32
Figura 4.11 - Drive NDC 06.V	32
Figura 4.12 - DIP switch da drive	33
Figura 4.13 - Sensor Indutivo do eixo X e Y	33
Figura 4.14 - Esquema de ligações da placa de amplificação do sensor de pressão	35
Figura 4.15 - Breadboard do sensor e circuito de amplificação	35
Figura 4.16 - Tubos de Pitot usados na experiencia	36
Figura 4.17 - a) Manómetro b) Posições disponíveis no manómetro para medir	37
Figura 4.18 - Esquema interno do variador.....	40
Figura 4.19 - Primeira versão da aplicação.....	41
Figura 4.20 - Botões de simulação do controlo manual.....	42
Figura 4.21 - Zona de configuração do eixo superior.....	43
Figura 4.22 - Zona do controlo da Velocidade do escoamento to túnel de vento	44

Figura 4.23 - aplicação final.....	45
Figura 4.24 - Posição inicial de ambos os posicionadores.....	46
Figura 4.25 - Posição central dos posicionadores.....	46
Figura 4.26 - Posição máxima dos posicionadores	46
Figura 4.27 - Aspeto final do quadro elétrico.....	47
Figura 4.28 - Zonas do quadro elétrico	47
Figura 4.29 - Numeração atribuída ao quadro elétrico.....	49
Figura 4.30 - Placa PCB do joystick	50
Figura 4.31 - Placa PCB de amplificação do sensor de pressão	51
Figura 7.1 - Aplicação Principal.....	57
Figura 7.2 - Menu de opções "Ficheiro" ativo	57
Figura 7.3 - Menu de opções "Opções" ativo	58
Figura 7.4 - Janela de configurações das comunicações ativa	58
Figura 7.5 - Janela de configurações do joystick ativa	59
Figura 7.6 - Aplicação principal alterada com as "Configurações Eixo Superior	59

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Material existente	17
Tabela 4.1 - Lista de saídas necessárias	23
Tabela 4.2 - Lista de entradas necessárias	23
Tabela 4.3 - Terceiro Nível do Manómetro (Fator de 0,2)	37
Tabela 4.4 - Segundo Nível do Manómetro (Fator de 0,1).....	38
Tabela 4.5 - Terceiro Nível do Manómetro (Fator de 0,05)	38
Tabela 4.6 - Material do quadro elétrico	50

Índice de Gráficos

Gráfico 4.1 - Comparação das relações velocidade/frequência da experiência	39
--	----

1 Introdução

1.1 Contexto

O avanço tecnológico das últimas décadas permitiu a integração da automação nos mais diversos setores industriais e científicos, com a consequente redução de custos e aumento da produção. A facilidade de instalação/programação dos autómatos resultou na sua aplicação noutras frentes, nomeadamente, para o controlo de servomecanismos, para a automação da domus - domótica. A automação dos processos permite uma maior repetibilidade, segurança e controlo dos ensaios experimentais. Esta é a estratégia do Departamento de Ambiente e Ordenamento da UA, que possui um túnel de vento no Laboratório 7.1.39 (Figura 1.1), cuja secção de teste é de 6,5 x 1,5 x 1m, dedicado à realização de estudos na camada limite atmosférica (escoamento e poluição atmosférica).



Figura 1.1 - Túnel de Vento do Departamento de Ambiente e Ordenamento

Na referida infraestrutura é necessário otimizar vários equipamentos: (i) o funcionamento do ventilador do túnel, comandado por um motor trifásico AC, cuja velocidade de rotação é manipulada manualmente, através de um variador de frequência; (ii) o sistema elétrico de posicionamento interno de 3 eixos (cada eixo atuado por um motor de passo) da secção de teste; (iii) os sistemas PIV (Particle Image Velocimetry)/Anemómetro de fio quente, para medições de velocidade do escoamento.

1.2 Problemas a resolver e sua importância

Na perspectiva de melhorar as condições de medição e segurança do túnel, será dimensionado e instalado um sistema de comando manual ou numérico do posicionamento das sondas internas da secção de testes, para medir a velocidade dos escoamentos e a concentração de partículas injetadas nos escoamentos. Pretende-se também controlar a velocidade dos escoamentos no túnel, gerados por um ventilador, acoplado ao motor de indução trifásico, controlado por um variador de frequência. Adicionalmente, será dimensionado um sistema de posicionamento para um conjunto espelho de reorientação de feixe e laser do sistema PIV, tecnologia descrita no próximo capítulo.

Tais alterações possibilitam a aplicação em situação real de conceitos de automação, servomecanismos e visão/percepção artificial, adquiridos ao longo do mestrado. Por outro lado, a dissertação de âmbito multidisciplinar integra o projeto “CLICURB - Qualidade da atmosfera urbana, alterações climáticas e resiliência” (FCT: EXCL/AAG-MAA/0383/2012), sendo os dados dos ensaios no túnel utilizados na modelação e validação de cenários atmosféricos resultantes das alterações climáticas, onde a automatização do equipamento traduzirá um contributo significativo na repetibilidade e precisão dos resultados, bem como uma redução significativa da duração dos ensaios experimentais e um aumento na segurança dos mesmos.

1.3 Objetivos

Tal como o título da dissertação indica, o principal objetivo deste trabalho é a melhoria substancial das condições de funcionamento e medição no túnel de vento através da introdução de processos automatizados, controlados pelo utilizador através de um computador dedicado. Isto passa pelo desenvolvimento de um conjunto de sistemas com base no cumprimento dos seguintes pontos:

- Dimensionamento e instalação de um sistema de comando remoto multifunções;
- Implementação de manipulação remota para o posicionador interior do túnel de vento e o variador de frequências;
- Estudo abrangente da:
 - velocimetria de partículas por processamento de imagens (*Particle Image Velocimetry*), sistema que utiliza um laser pulsado e um arranjo de lentes para criar um plano iluminado, a partir do qual podem determinar-se campos bidimensionais das velocidades do escoamento por intermédio das imagens de uma câmara CCD (*Charge-Coupled Device*), obtidas de uma posição perpendicular ao plano iluminado;
 - deteção rápida de ionização de chama (*Fast Flame Ionization Detection*, FFID), sistema que mede o número de iões formados na combustão de um hidrocarboneto e

capturados num coletor, na determinação de concentrações pontuais de gases e partículas presentes no escoamento;

- anemometria de fio quente que quantifica o fluxo de calor entre um fio aquecido (a temperatura constante) e o escoamento incidente na obtenção da velocidade do escoamento num ponto.
- Dimensionamento de sistema de posicionamento por controlo remoto (Eixo Superior) para o sistema de PIV devido à necessidade da criação de planos iluminados em zonas/orientações distintas;
- Utilização experimental do sistema PIV e anemómetro de fio quente;
- Aquisição e transmissão de dados de velocidade do vento através de um software dedicado.

1.4 Organização da tese

A presente tese contém 5 capítulos.

Após o enquadramento do trabalho no presente capítulo, segue-se o estado da arte no Capítulo 2. Aqui são abordados alguns conceitos usados no decorrer do trabalho e as tecnologias usadas no túnel de vento para medir velocidades de escoamentos e/ou visualizar estruturas de escoamentos. Adicionalmente é realizada uma pesquisa para averiguar a existência de soluções académicas ou artigos científicos que abordem o problema proposto.

No capítulo 3 é proposta uma nova solução bem como a abordagem feita para desenvolver todos os sistemas necessários e integrá-los num único sistema de controlo.

No capítulo 4 são apresentados os componentes necessários para implementação no sistema, bem como a divisão em sub-tarefas para facilitar a resolução do problema final.

Por fim, o Capítulo 5 é reservado para a conclusão relativa ao trabalho estabelecido e para algumas sugestões de trabalho futuro.

2 Estado de arte

2.1 Conceitos

Túnel de vento

O túnel de vento presente no Departamento de Ambiente e Ordenamento (DAO) é do tipo ambiental, sendo capaz de simular a camada limite da atmosfera. Atualmente, os túneis de vento são usados em estudos aerodinâmicos, potencial eólico e variadas simulações. Numa perspetiva ambiental, estes estudos incluem a dispersão de poluentes, emitidos pelos transportes e a indústria em zonas urbanas, cuja análise permite a identificação de zonas de maior risco de exposição e, consequentemente, a conceção de medidas de mitigação de tais efeitos (Costa Riethmuller & Borrego, 1994). O túnel de vento no DAO, com um comprimento total de 12 m, tem uma secção de ensaios de 6,5 x 1,5 x 1 m e um ventilador alimentado por um motor AC de 7,5 kW, a si acoplado, controlado por um variador de frequências (Figura 2.1).

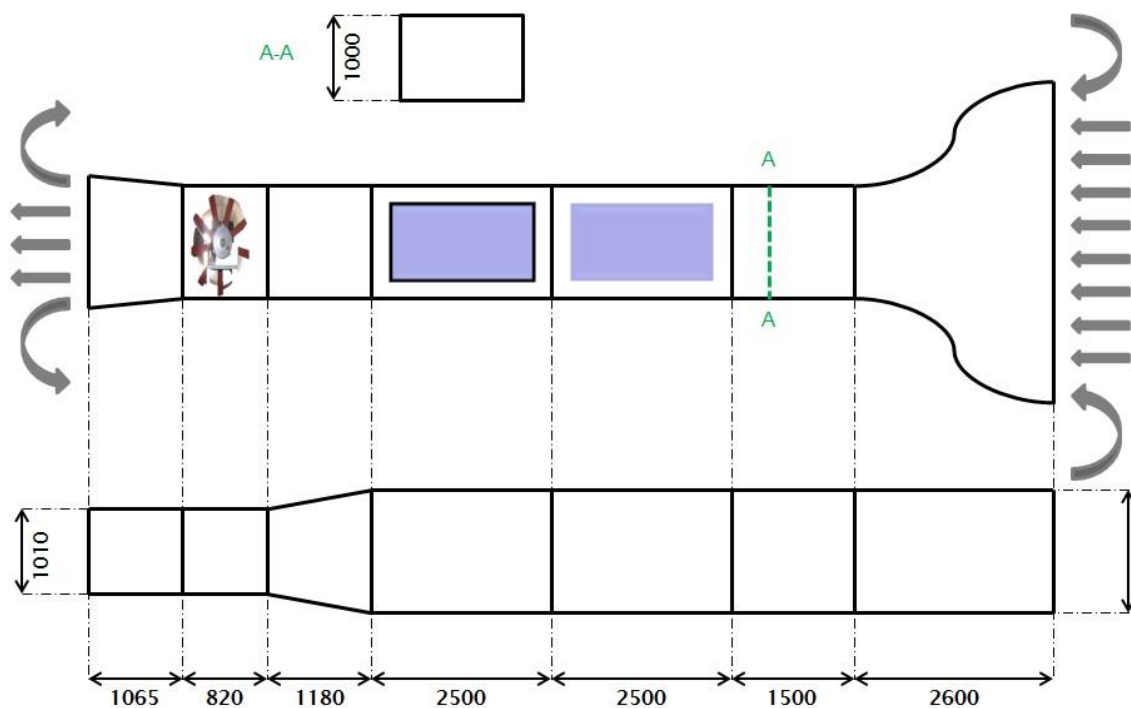


Figura 2.1 - Desenho do túnel de vento

2.2 Tecnologias

Tubo de Pitot

O tubo de Pitot é um instrumento largamente usado para medir indiretamente a velocidade do escoamento de fluidos, através da medição direta das pressões. Este não permite medir a velocidade de todo o escoamento, mas sim de um ponto do mesmo. Adicionalmente, o tubo de Pitot apresenta algumas desvantagens, pois tem de estar alinhado frontalmente com a direção de

escoamento do fluido, que pode não ser conhecida. Por ação da baixa resposta em frequência dos manómetros comuns, este também é impreciso em escoamentos instáveis. Este método de medição é intrusivo e pode influenciar o escoamento na sua vizinhança.

Ao entrar no tubo, o fluido em movimento cria pressão (pressão total, P_2), com a qual é possível calcular a velocidade do escoamento através da sua relação com a pressão estática (P_1) pela equação de Bernoulli $v_s \approx v = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}}$, em que ρ é a densidade do fluido. A Figura 2.2 demonstra as pressões e como estas são medidas.

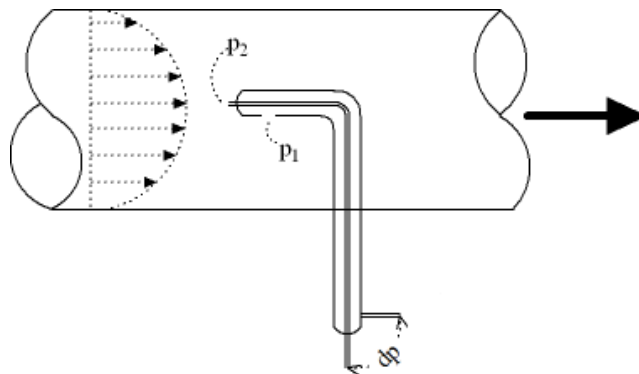


Figura 2.2 - Esquema interno de um tubo de Pitot (The Engineering ToolBox, 2014)

Anemómetro de fio quente

O anemómetro de fio quente é usado para medir a velocidade pontual de escoamentos, sendo particularmente vantajoso na medição de escoamentos turbulentos, pois este método tem uma rápida resposta, permitindo assim medir rápidas variações da velocidade. Este método é pouco intrusivo devido ao baixo diâmetro do sensor (igual ou inferior a 0,01 mm), que é um filamento aquecido a temperatura constante, tipicamente posicionado em paralelo ao escoamento. A metodologia consiste na quantificação do fluxo de calor do sensor para o escoamento que o atravessa, podendo ser quantificado através da variação da temperatura (*CTA-constant temperature anemometer*), tensão (*CVA-constant voltage anemometer*) ou corrente (*CTA-constant temperature anemometer*) por transdução. Todos eles tentam manter uma propriedade constante (corrente, tensão ou temperatura) obedecendo à lei de Joule e à lei de King, $q = I^2 \times R \approx a + b \cdot (\rho \times V)^n$ onde n , a e b são determinados por calibração. Este sensor deve apenas ser usado em escoamentos onde não existem partículas sólidas no ar, uma vez que estas podem colidir com o filamento e quebrá-lo (Borrego, 2003).

Sensor Térmico de Escoamentos

Com vista a substituir o manómetro manual, incapaz de detetar variações súbitas da velocidade e com fortes limitações na medição de velocidades baixas ($u < 5 \text{ m/s}$), foi adquirido no âmbito da tese um sensor que recorre à tecnologia de medição baseada nas propriedades térmicas de um fluido. Este sensor tem uma fonte de calor interna, esta fonte tem sempre valor constante. A temperatura do escoamento é medida na entrada da zona de medição, de seguida passa pela zona de aquecimento, onde o fluido aquece e, de seguida, passa por um segundo sensor de temperatura que mede o aumento de temperatura que o fluido sofreu. No entanto existem outros tipos de sensor que seguem este mesmo princípio, estes têm um elemento aquecido, ao mesmo é aplicada uma corrente constante que o mantém a uma temperatura constante caso não exista escoamento. Com o aumento/diminuição da velocidade do escoamento, a temperatura varia, é registada esta variação e de seguida traduzida para um valor de pressão/fluxo (Universal Flow Monitor, 2014). Um esquemático do sensor adquirido pode ser observado na seguinte imagem. Como é possível observar, existem dois sensores de temperatura e, entre eles, a fonte de calor (Heater) (Sensirion, 2014).

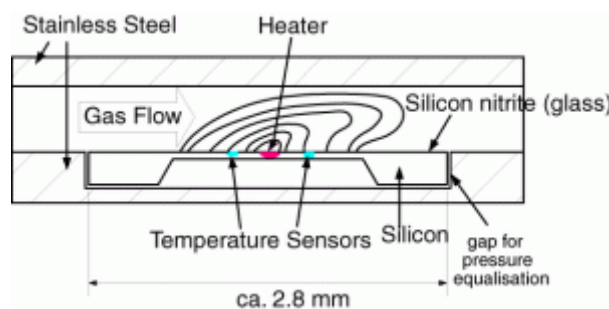


Figura 2.3 - Esquemático de um sensor térmico de escoamento (Sensirion, 2014)

O sensor de pressão será ligado na zona de dP da Figura 2.2.

Fast-Response Flame Ionization Detector

O Fast-response Flame Ionization Detector (FFID) é um instrumento de medida usado para medir as concentrações de hidrocarbonetos (HC). Flame Ionization Detector (FID) usa um processo semi-ionizante que produz uma tensão proporcional aos hidrocarbonetos presentes na amostra. A chama do FID é alimentada por uma mistura de H_2 , ar e o gás de referência (normalmente propano), que é queimado para dar origem aos iões. Os hidrocarbonetos ao passarem pela chama separam-se e formam iões, que são recolhidos pelo coletor, produzindo corrente. A corrente está diretamente relacionada com o número de iões, permitindo assim saber a concentração de HC na mistura de ar. A calibração deste sensor é feita com um gás de concentração de HC conhecida. No

entanto, os FID convencionais têm uma resposta lenta e para certas aplicações é necessário respostas mais rápidas. Para tal usam-se os FFID, estes instrumentos de medida, como o próprio nome indica, têm uma resposta mais rápida, permitindo no mesmo intervalo de tempo, recolher um número de amostras muito superior ao FID.

Particle Image Velocimetry

Particle Image Velocimetry (PIV) é uma metodologia usada para medir o campo de velocidades de uma massa de ar. Esta velocidade é medida recorrendo a um feixe de laser que ilumina partículas presentes num plano do escoamento de ar que circula no túnel de vento. Estas partículas adicionadas, ao serem excitadas pelo (comprimento de onda do) laser incidente, permitem a sua identificação nas imagens da câmara CCD.

Esta câmara CCD de alta velocidade retira duas fotografias, uma por cada pulso do laser, permitindo assim em cada foto ver as partículas que, ao serem atingidas pelo pulso do laser, se tornam visíveis. De seguida estas fotos são descarregadas para o computador. Para processar toda a informação recolhida é necessário usar um software especializado de elevada complexidade. O software separa e analisa a imagem por sectores, recorrendo a um algoritmo chamado cross-correlation em cada, sendo identificadas as partículas e o seu deslocamento. Do deslocamento de cada partícula irá resultar um vetor que traduz a velocidade e sua direção. Ao juntar todos os vetores de todas as partículas é possível obter os padrões do escoamento, bem com a deteção de vórtices e recirculações no mesmo.

No pós-processamento é possível, recorrendo ao *Matlab* ou *TecPlot*, obter uma imagem onde a magnitude dos vetores é representada por uma escala de cores, obtendo assim uma ilustração representativa do campo de velocidades no plano do escoamento onde o laser incidiu (Jahanmiri, 2011).

EIA-232

EIA-232, também conhecido por RS232, é um protocolo desenvolvido no início dos anos 60 (Strangio, 1993) por “Electronic Industries Association” como uma aplicação *standard* a ser usada pelos equipamentos de comunicação. Na altura era necessária uma aplicação que permitisse comunicar entre um computador terminal e um *modem* ou possivelmente entre dois terminais sem um computador intermédio. Foi com estas ideias que esta norma apareceu. Esta norma especifica tensões, tempos dos sinais e funções, bem como as fichas a serem usadas.

As tensões usadas podem variar, mas nem todas as variações são aceitáveis. Este protocolo define que a tensão deve ser bipolar, ou seja, positiva (12V) ou negativa (-12V) em torno da massa. Se a linha estiver a zero, este valor não é interpretado como um valor lógico, apenas pode ser uma indicação de que o aparelho emissor está desligado. Para se ler um bit com o valor '1' as tensões devem variar entre 5V e 15V negativos, nunca devendo ultrapassar os 25V, para ler um bit '0' o valor deve situar-se entre 5V a 15V positivos. Valores intermédios serão desprezados e ignorados. Por isso é necessária precaução ao ligar equipamentos, pois estes podem funcionar em níveis TTL, ou seja, operar em gamas de 0V a 5V e não de -12V a 12V (Lawyer, 2013).

Modbus

O *Modbus* é um protocolo desenvolvido pela *Modicon*, sendo atualmente mantido e gerido pela *Modbus User Organization*, hoje em dia o modo bus permite a comunicação de milhões de autómatos. Este protocolo usa códigos para recolher informação ou atender a pedidos de aparelhos da rede. O *Modbus* é um protocolo que pode usar várias redes de comunicação presentes num sistema, como TCP/IP, RS485, RS232, entre outras. Como a rede física a usar fica ao critério do utilizador, os aparelhos têm de respeitar não só as regras de onde estão implementados, como também a estrutura do protocolo *Modbus*. Em *Modbus* existem *slaves* e um *master*, decidindo assim quem pode enviar dados em que altura. Ao funcionar sobre outras redes, os aparelhos que o usem têm de seguir as regras da rede onde se encontram, sendo isto implementado por *hardware*, ao contrário do *Modbus*, um protocolo todo implementado por software. O *Modbus* tem uma estrutura bem definida que tem de ser cumprida para que todos os aparelhos da rede possam comunicar entre si e sem falhas.

1 byte	1 byte	Comprimento variável: 0 a 252	2 bytes
Endereço	Função	Dados	CRC/LRC

Figura 2.4 - Estrutura da mensagem Modbus(Santos, 2010)

A Figura 2.4 representa a estrutura da mensagem. O endereço vai de 0 a 255, no entanto alguns números estão reservados para funções especiais. Por exemplo, se o aparelho *master* enviar uma mensagem com o endereço zero, esta será enviada para todos os aparelhos. Os *slaves* podem ser endereçados de 1 a 247, estando os endereços 248 a 255 reservados para o protocolo. No *Modbus* existem funções, ou seja código que ao ser enviado para o *slave* origina uma determinada resposta, sendo esta sempre igual, como por exemplo o código 05, este irá ativar ou desativar uma saída do *slave* para onde for enviado este comando. No campo de dados, vai a informação sobre o estado que uma saída analógica ou digital deve assumir, entres muitas outras informações. O CRC/LRC é

um mecanismo criado para detetar erros na transmissão dos dados entre as linhas, evitando assim a execução de ordens corruptas originadas por um erro no envio. Existem duas formas de calcular estes 2 bytes, mas estes são calculados de acordo com o tipo de *Modbus* que se usa, se *RTU* ou *ASCII*.

Estes dois modos de envio de informação diferem na codificação e modo de transmissão da informação. O modo *ASCII* usa 7 bits para enviar as suas mensagens. As mensagens são codificadas recorrendo aos números de 0 a 9 e as letras de A a F. Para iniciar uma mensagem em modo *ASCII* utiliza-se “:” e para terminar CR/LF. Para permitir a verificação de erros na transmissão, é também enviado o *Longitudinal Redundancy Check (LRC)*, correspondente à negação da soma de todos os bytes enviados excluindo o primeiro e os últimos dois bytes e somando um ao valor obtido, se o valor estiver de acordo com o LRC então a transmissão é bem-sucedida (Santos, 2010).

Ao comparar os modos *ASCII* com *RTU*, é possível observar que o modo *RTU* irá enviar menos dados devido ao seu modo de estruturar as mensagens. Este envia a sua informação em formato binário, ou seja de 0 a 255 (8 bits de comprimento). À semelhança do modo *ASCII*, o modo *RTU* tem implementada uma maneira de verificar os erros, chamada de *Cyclic Redundancy Check (CRC)* (Real Time Automation, 2014).

2.3 Soluções científicas e académicas propostas por outros

Nesta secção são apresentados um artigo e duas teses: o problema que pretendem resolver, a solução proposta e a sua implementação. O artigo foi útil pois permite observar como outros autores abordaram problemas similares ao problema da presente tese. As teses forneceram ideias de como abordar o controlo do sistema ou de como abordar o problema geral.

2.3.1 Artigo - Design, Sensing, and Control of a Scaled Wind Tunnel for Atmospheric Display

Este artigo pretende demonstrar como criar vento, num ambiente virtual, simulando a realidade. Este trabalho descreve o desenho, os sensores e o controlo do túnel de vento. Os túneis de vento são usados normalmente para fornecer dados sobre a aerodinâmica de veículos, superfícies ou simular escoamentos atmosféricos. Dada a complexidade do fluxo do vento e a necessidade do seu controlo em tempo real, foi necessário aplicar técnicas para desenvolver as entradas e saídas. Num túnel de vento é necessário controlar a direção (ângulo de incidência) do vento, variando a rotação do objeto de estudo. Alguns túneis também usam acessórios fixados às paredes do túnel para alterar as velocidades do escoamento (KulkarniMinorDeaverPardyjak& Hollerbach, 2012).

2.3.2 Tese 1 - Infraestruturas eólicas: módulo autónomo de monitorização

A dissertação “Infraestruturas eólicas: módulo autónomo de monitorização” descreve a conceção e o desenvolvimento de um módulo autónomo capaz de monitorizar e armazenar os vários parâmetros eólicos e de uma instalação elétrica da torre eólica presente no campus da Universidade de Aveiro.

Este módulo é usado em micro e mini-aerogeradores. Foi concebida uma aplicação gráfica para um conjunto de sensores para a monitorização da direção e da velocidade do vento assim como a quantidade de energia produzida, com suporte à comunicação sem fios e o armazenamento de dados para posterior tratamento (Pereira, 2010). Na Figura 2.5a encontra-se o módulo autónomo desenvolvido para medir (bloco 1), armazenar (bloco 3-MicroSD) e processar os valores recolhidos dos sensores (bloco 5-Microcontrolador).

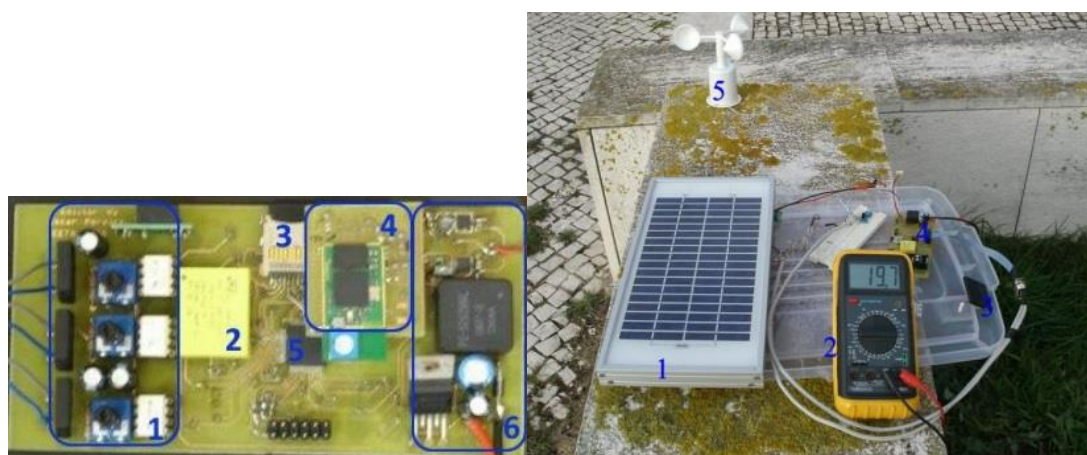


Figura 2.5 - a) Módulo Autónomo de Monitorização b) Teste Prático de Autonomia (Pereira, 2010)

Este módulo tem capacidade para medir e guardar a informação necessária quer em cartão SD, como através do envio da mesma através de uma comunicação sem fios (bloco 4, usando Bluetooth). Por fim, este tem um circuito integrado que tem relógio e calendário (bloco 2) bem como uma bateria para alimentar todo o sistema (bloco 6).

A Figura 2.5b mostra alguns dos sensores implementados, como um anemómetro (5), um sensor da direção do vento e um sensor de corrente. Para alimentar todo o sistema, foi instalado um painel solar de 5 W (1). Este fornece energia a dois reguladores de tensão e carrega uma bateria para o sistema poder ser monitorizado em períodos de fraca luminosidade. Pelo fato de ser um sistema que pode ser instalado em qualquer região, é necessário armazenar os dados recolhidos, tendo para tal instalado um cartão SD. Para uma poupança superior de energia, foi instalado um *switch*

analógico a todos os sensores, permitindo ter qualquer arranjo de sensores ligados ou desligados (instalado no módulo 4).

O *software* usado foi o *MatLab*, pois este permite uma análise facilitada dos dados sobre o funcionamento do módulo.

2.3.3 Tese 2 - Desenvolvimento de um indexer para comando XY de dois motores passo-a-passo

Esta dissertação, intitulada “Desenvolvimento de um *indexer* para comando XY de dois motores passo-a-passo”, tem por objetivo principal o desenvolvimento de um sistema de comando de dois eixos (XY) para motores passo-a-passo, baseado num *Programmable Logic Controller (PLC)* com uma aplicação série. Este troca mensagens com um sistema hierarquicamente superior.

O sistema de comando XY deverá ser capaz de sincronizar o movimento dos dois eixos, para garantir que o elemento a posicionar efetue trajetórias lineares.

O sistema deve permitir comandar todo o tipo de ações sobre cada um dos motores de passo, tais como: definir o sentido de rotação, tempo entre dois impulsos e a escala (ms ou μ S) a que cada passo é incrementado, tipo de passo e o acionamento da *drive* (Pinto, 2011).

O objetivo deste trabalho foi a elaboração de um *indexer* que permitisse controlar o posicionamento do elemento móvel do sistema *Modular Production System (MPS) Festo*, disponível na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), visível na Figura 2.6, segundo os eixos X e Y, confinado a uma área de trabalho limitada.



Figura 2.6 - Unidade de demonstração de produção flexível (Pinto, 2011)

É necessário que este consiga comunicar e sincronizar-se com o autómato *Siemens* do sistema. O mesmo tem como função deslocar a ferramenta de corte segundo o eixo Z, de forma perpendicular aos eixos X e Y. A ferramenta de corte encontra-se fixa ao elemento móvel a posicionar.

A solução consistiu, em grande parte, no desenvolvimento de um programa relativo ao *indexer* que assegurasse o correto funcionamento de determinadas funcionalidades, bem como habilitar a comunicação via porta serie entre dois controladores.

Uma vez que se pretendia testar a solução deste projeto no sistema *MPS Festo*, a comunicação foi realizada entre o autómato (*s7-300*) da unidade e o *indexer* (*s7-200*) de forma a obter-se a sincronização dos movimentos segundo os eixos X e Y com o movimento segundo o eixo Z, i.e., obter-se a sincronização da tarefa de posicionamento XY com a tarefa do movimento ascendente ou descendente da ferramenta de corte.

Este trabalho passou por 4 fases: Na primeira, controlou-se um motor de passo através de um PLC e uma consola. Na segunda, desenvolveu-se um *software* para enviar e receber mensagens. Na terceira fase, estabeleceu-se a interligação dos dois sistemas desenvolvidos anteriormente, controlando um motor passo-a-passo usando o *software* criado na fase 2. Na fase 4, os objetivos eram controlar a trajetória linear de dois motores passo-a-passo através de um protocolo de comunicação e estabelecer comunicações entre o *indexer* e um outro controlador.

2.4 Soluções comerciais atuais

Atualmente no mercado devido ao seu tamanho, foi encontrado um programa desenvolvido apenas para o controlo de túneis de vento (Nasa, 2014). No entanto, existem outros programas que são usados pelas ferramentas/características que possuem, tal como o *NI LabVIEW*. Este programa pertence à *National Instruments* e tem “um conjunto abrangente de ferramentas que lhe permite desenvolver qualquer aplicação de medição ou controlo, em muito menos tempo”, ou seja, permite com alguma facilidade mudar a aplicação gráfica para analisar os dados pretendidos e da forma necessária para cada experiência (National Instruments, 2014).

2.5 Situação inicial

No túnel de vento são realizadas experiências em que pode ser necessário medir várias grandezas, como o estudo da dispersão de poluentes atmosféricos em meios urbanos (requer a medição simultânea da velocidade do escoamento e da concentração de vários poluentes emitidos), ou a mesma grandeza em posições distintas, como é o caso da verificação experimental do conforto

eólico ou o estudo da independência do número de Reynolds (Re), número adimensional que caracteriza o escoamento (laminar/turbulento) (Tansley & Marshall, 2001), do túnel de vento (escala reduzida) em relação à escala real (teste da similaridade dinâmica).

Para tal as sondas são colocadas manualmente, como sucede com o anemómetro de fio quente e os tubos de Pitot (velocidade do escoamento) e o Fast FID (concentração de poluentes).

Com o sistema existente, o utilizador tem à sua disposição uma fraca gama de posições devido à estrutura do túnel (difícil medição em vários pontos com grandes distâncias entre si bem como a medição em pontos próximos à superfície inferior do túnel) e baixa repetibilidade no posicionamento das sondas nas posições disponíveis.

Para além da fraca gama de posições, sempre que seja preciso deslocar uma sonda, é necessário parar a experiência e ajustar a posição da sonda manualmente, obrigando o utilizador a entrar no túnel. A necessidade de reposicionar as sondas manualmente (como no interior de uma avenida urbana, por exemplo) também aumenta a probabilidade de choques (por parte dos sensores ou do utilizador) com as maquetes, podendo resultar na danificação de sensores ou elementos das maquetes.

No decurso duma experiência, todas estas paragens levam a que esta seja uma operação desnecessariamente demorada, pois é necessária a realização de medições em vários pontos, resultando em várias paragens da experiência.

O túnel de vento possui um sistema de posicionamento interno, que poderia auxiliar no posicionamento das sondas sem paragens significativas, mas este encontrava-se inativo.

Para além das sondas é necessário posicionar o laser do sistema PIV para permitir a folha laser incidir na zona onde se pretende efetuar medições. Adicionalmente, a ausência de um suporte fixo para o laser implica que este tem sido operado na posição vertical, o que acelera o seu desgaste devido à má orientação da sua lâmpada e vareta laser interiores.

3 Proposta de uma nova solução

3.1 Levantamento do material/Proposta

Para solucionar os problemas atrás descritos, houve a necessidade de realizar um levantamento do material existente no túnel de vento. Não havendo documentação sobre os sistemas instalados no túnel, começou por se analisar o posicionador inicialmente instalado e perceber o seu mecanismo, o que permitiu concluir que havia 3 motores de passo instalados que permitem mover o posicionador em 3 eixos (X, Y, Z). A seguinte figura mostra o posicionador e os possíveis movimentos de cada eixo.

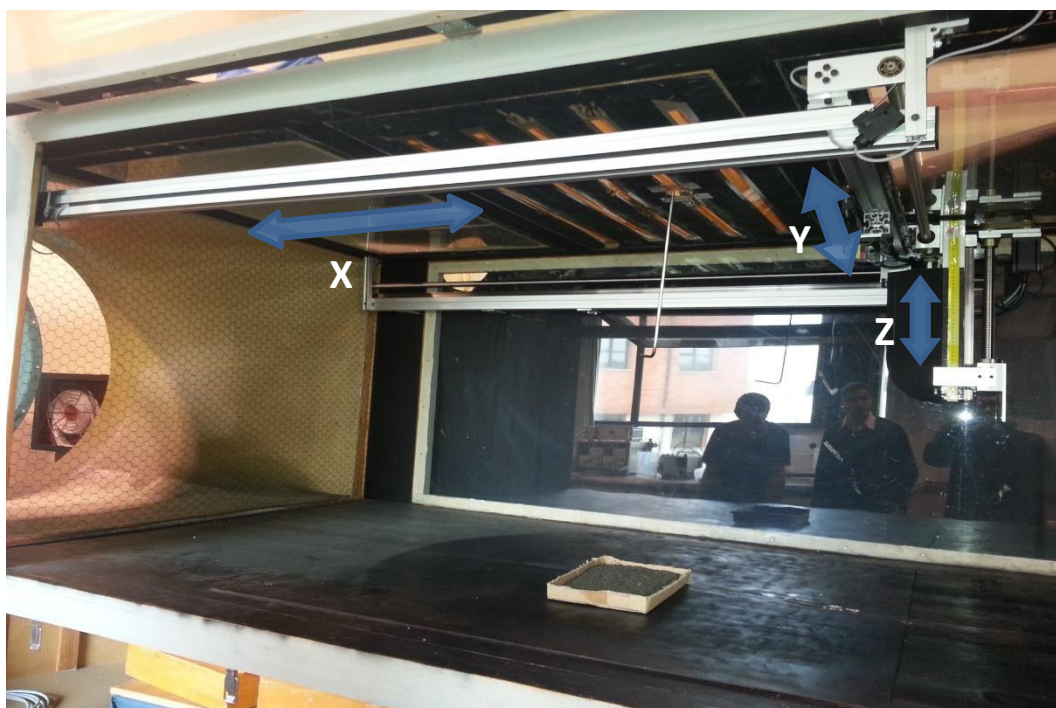


Figura 3.1 - Ilustração dos movimentos possíveis no eixo interno

De seguida foi pesquisada a referência de cada componente, o que permitiu obter os manuais com toda a informação sobre cada um, desde esquema de ligação a características específicas do material (velocidades, forças, etc.).

Numa segunda foto são identificados os sensores fim de curso e respetiva numeração.

Adicionalmente, constatou-se que a cada motor está associado uma *drive*, instalada no quadro

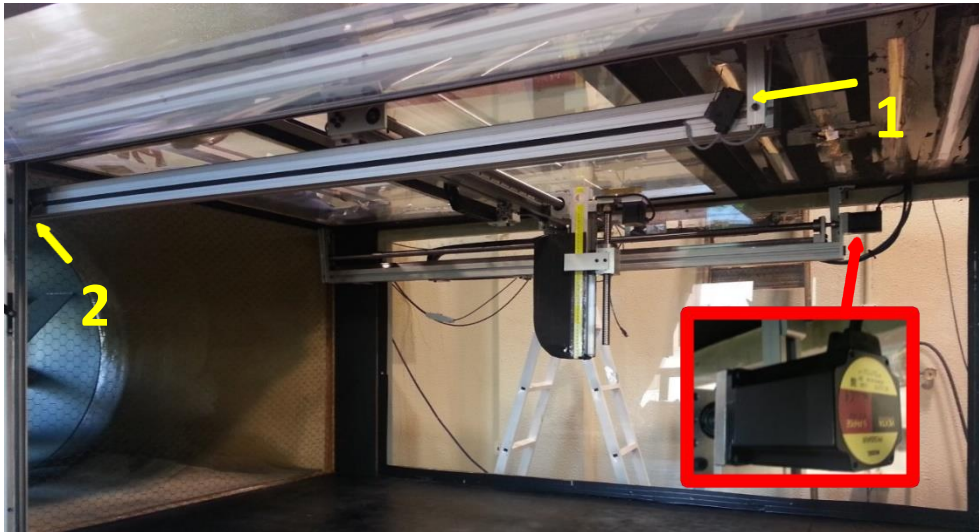


Figura 3.3 - Posicionamento dos sensores/motor do eixo X no túnel de vento

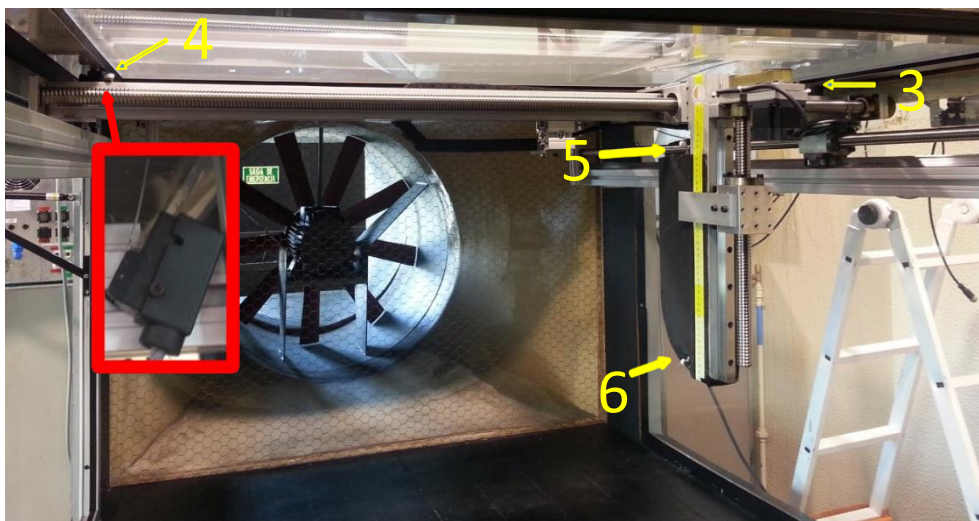


Figura 3.2 - Posicionamento dos sensores no eixo Y e Z do túnel de vento

elétrico, que permite controlar a posição dos motores de passo através de um sinal de impulsos. Retirou-se a referência para posteriores estudos de como gerar o sinal necessário para controlar a *drive* em questão.

O presente túnel de vento também é munido de um variador de frequência que, por sua vez, atua sobre um motor com um ventilador acoplado na geração dos escoamentos (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Ventilador e variador do túnel de vento

A seguinte tabela apresenta o material inicialmente presente no túnel bem como a sua referência.

Tabela 3.1 - Material existente

Quantidade	Nome	Ref
3	Motor de Passo	PK569 AW
3	Drive do motor de passo	RKD514L-C
6	Fim-de-curso mecânico	-
1	Variador de frequência	Freqrol A200
1	Motor trifásico	-

Uma vez criada a lista de material existente, foi possível idealizar um sistema capaz de realizar as tarefas pretendidas. O diagrama seguinte (Figura 3.5) resume como o trabalho vai ser abordado. As grandezas a ler ou necessárias controlar vão ser processadas numa Unidade de processamento, de seguida em conjunto com os dados inseridos na aplicação gráfica, a mesma irá atuar no sistema de posicionamento correspondente ou atuar sobre a velocidade do variador de frequência.

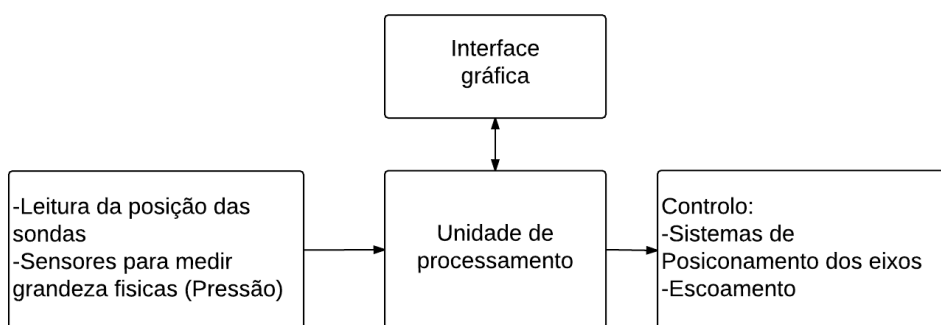


Figura 3.5 - Diagrama da proposta do autor

Tendo uma proposta idealizada foi possível de seguida dar início à separação do problema em sub-problemas como descrito no subcapítulo 3.2.

3.2 Etapas do trabalho

Com o intuito de facilitar a resolução do problema presente este foi dividido em 5 sub-problemas a concretizar no próximo capítulo: Hardware, Sistema de Posicionamento Interno, Sistema de Posicionamento Externo, Variador de frequência, Aplicação gráfica e, por fim, uma Análise dos resultados.

No “*Hardware*” será abordado todo o material adquirido/escolhido, bem como as suas especificações. Será realizado um levantamento completo das referências do material existente e as soluções disponíveis para seu controlo/utilização. Será também abordada a necessidade de eventuais materiais adicionais, que não estavam inicialmente presentes mas que seriam fundamentais para o bom funcionamento de alguns dos sistemas.

No “Sistema de Posicionamento Interno” será abordada a construção do sistema que irá receber e enviar a informação do joystick, desde a programação do microcontrolador responsável por receber a informação à aplicação que liga com a mesma.

No “Sistema de Posicionamento Externo” será debatida a escolha do novo posicionador externo, a motivação pela marca escolhida e material a adicionar para o controlo dos mesmos, para permitir posicionar o laser do sistema PIV.

No “Variador de Frequência” serão apresentados os sistemas criados para apoiar o sensor de pressão, testes de verificação à fiabilidade do sensor e o tipo de controlador utilizado para facultar o controlo do variador.

Tal como o nome indica, o subcapítulo “Aplicação gráfica” é dedicado à criação da aplicação do utilizador, bem como as seleções associadas, desde a linguagem às ferramentas usadas no projeto. Por fim, na “Resultados Finais” é realizada uma verificação geral ao sistema implementado, no qual serão testados todos os componentes criados bem como todas as respostas, tendo como intuito encontrar erros na aplicação, pois o objetivo principal desta tese é criar um sistema que possa ser usado em futuros testes no túnel de vento, pelo que é preciso que a aplicação esteja livre do maior número de bugs.

4 Implementação da solução proposta

Tendo estabelecida a abordagem a utilizar na resolução do problema presente, começou por se decidir que componentes usar para cada tarefa proposta. Como é necessário inserir um controlo manual, para facilitar ao utilizador o uso do túnel de vento, optou por se inserir um *joystick* e um microcontrolador para ajudar neste controlo. Recorrendo aos motores presentes, e em conjunção com o *joystick*, foi possível criar o controlo do sistema de posicionamento interno. Para posicionar o laser do PIV houve a necessidade de adquirir todo o equipamento para movimentar o mesmo. Como é necessário controlar a velocidade do variador, e tendo em conta que o manómetro presente não permite ser ligado ao sistema, houve a necessidade de substituir o mesmo por um sensor de pressão para o controlo da velocidade do variador. A Figura 4.1 é um esquema das interações do sistema que o autor se propõe criar. Seguidamente irá ser explicado a função de cada componente assinalado no sistema.

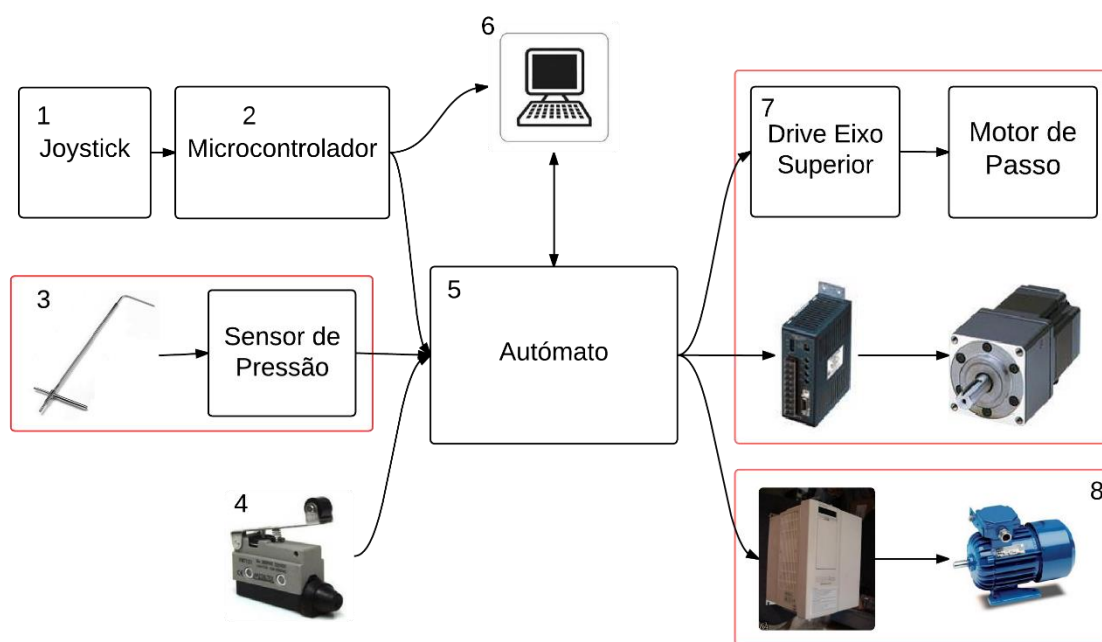


Figura 4.1 - Esquema da proposta

Joystick (1)

O *joystick* (Figura 4.2) foi escolhido para auxiliar o utilizador no movimento simplificado e rápido do posicionador interno presente no túnel de vento. O recurso exclusivo a uma escala numérica iria dificultar ao utilizador principiante guiar o posicionador à posição desejada. Sendo assim, com o sistema a criar o utilizador poderá mover o equipamento até a posição desejada e depois, através da aplicação, pode registar as coordenadas ocupadas pelo posicionador. Com o auxílio dos botões

do *joystick* será possível mover os 3 eixos, facilitando assim o manuseamento mesmo para utilizadores inexperientes.



Figura 4.2 - Joystick

Microcontrolador (2)

O microcontrolador foi inserido no sistema para registar/capturar todos os movimentos do *joystick* e, de seguida, transmitir essa informação para a aplicação ou para o autómato. Este irá registar os valores da posição do *joystick* recorrendo a suas ADC internas, convertendo o sinal analógico e o estado dos botões para informação que pode ser enviada por uma das portas de comunicação disponíveis no microcontrolador. Este terá de ser configurado de maneira a enviar esta informação para dois sítios, computador e aplicação, precavendo assim alguma ligação mal estabelecida por parte do utilizador ou mesmo a remoção da ligação ao autómato. Este dispositivo foi escolhido para esta tarefa por duas razões específicas, preço e desafio académico. Pois, entre o custo de uma carta analógica de um autómato e o preço de um microcontrolador, o microcontrolador é muito mais barato.

Sensor de pressão (3)

Com vista a substituir o manómetro manual, incapaz de detetar variações súbitas da velocidade, foi planeada a aquisição de um sensor de pressão no âmbito da presente tese. Este sensor (transdutor) mede a diferença entre as pressões total e estática e transforma o resultado em sinal elétrico por transdução térmica. A gama necessária a ler será calculada mais tarde para posterior pesquisa de sensores capazes de realizar a tarefa pretendida.

Fim de curso (4)

O fim de curso é um dispositivo que permite ao utilizador saber se um objeto a ser atuado chegou ao fim do curso disponível ou previamente definido para o movimento. O túnel de vento tem seis fins de curso, instalados com o intuito de possibilitar o sistema saber se o posicionador interior se encontra num dos extremos do eixo correspondente. Como será instalado mais um posicionador foi necessário adquirir fins de curso adicionais para desempenharem a mesma função dos inicialmente instalados. Estes dados são recolhidos pelo autómato e, caso se chegue ao fim de curso, o mesmo atua consoante as suas ordens.

Autómato (5)

A unidade de processamento escolhida para o sistema foi o autómato. Esta escolha deveu-se a várias razões. Uma delas é o facto de o autómato estar inserido num ambiente com bastante pó, mas também ser um ambiente com vibrações criadas pelo túnel de vento em funcionamento, pelo que a robustez que caracteriza estes dispositivos será vantajosa. O autómato irá controlar as *drives* dos motores de passo existentes no túnel de vento, suas restrições de movimento dadas pelos fins de curso, contudo outros possíveis entraves ao movimento dos motores serão tidos em conta no programa.

O comando dos motores será feito a partir da aplicação a criar, permitindo enviar o motor para uma coordenada específica ou movimentar o motor manualmente (joystick), apenas parando quando o utilizador desejar. O autómato, em conjunto com algumas informações recebidas da aplicação, será o centro de todas as decisões do sistema e controlará todo o posicionamento dos motores depois de receber ordem da aplicação. Além do movimento dos motores, o autómato também será responsável por receber os estados de todos os fins de curso e, de seguida, enviar esses mesmos estados para o computador, para quando a aplicação quiser movimentar um motor saber se este já está no fim do curso ou não. O controlo do variador também cabe ao autómato, este será realizado com base nos valores lidos do sensor de pressão. Um dos objetivos deste trabalho é que o mesmo seja feito de forma automática, recorrendo a um algoritmo de controlo.

Computador/ aplicação gráfica (6)

A aplicação a criar terá de ser capaz de processar todos os dados recebidos dos sensores e, consoante estes mesmos dados, comandar o autómato. Para poder processar estas informações tem que ter a capacidade de receber/solicitar a informação através de dois meios de comunicação,

RS232 e Ethernet. Para comunicar com o autômato, foi selecionado o protocolo *Modbus*, que necessitará a criação do mecanismo para tal comunicação funcionar. Esta terá também de reenviar as ordens vindas do *joystick*, para movimentar o posicionador, ou de um controlador numérico instalado na aplicação, conduzindo o motor para a posição definida. Com vista a precaver um mau funcionamento do *joystick* será instalado um sistema de setas de direção, para manipulação com teclado, que irá ser uma segunda opção caso o joystick tenha uma avaria. Como existia inicialmente um posicionador instalado e planos para um segundo posicionador, para movimentar o PIV, então a aplicação terá de ter duas zonas de movimentos para posicionadores, uma para o posicionador interno no túnel de vento e outra para o posicionador externo.

Drives/Motor de Passo (7)

A *drive* (Figura 4.3) é um dispositivo capaz de gerar os sinais de tensão e direção necessários para mover um motor de passo. Para gerar estes sinais esta precisa de dois sinais de entrada. Um sinal é a direção do movimento e o outro é o sinal de impulsos. Cada impulso do sinal irá mover o motor uma distância fixada pela configuração da *drive* e as características do motor, pois muitas das drives atuais permitem usar micro-step, ou seja, uma distância muito mais pequena do que a do motor normalmente iria se mover por passo. No presente caso, os motores de passo existentes normalmente movem-se $0,72^\circ$, alterando as configurações da *drive* é possível obter um mínimo micro-step de $0,00288^\circ$. No entanto, na presente utilização dos motores não será necessário recorrer-se aos micro-step, pois os motores estão a acionar parafusos sem fim, sendo $0,72^\circ$ suficiente para o movimento do motor. Cada impulso dado à *drive* irá fazer movimentar o motor $0,72^\circ$ para um dos lados, dependendo da direção do sinal na *drive*. Este sinal de impulsos também controla a velocidade a que estes movimentos ocorrem, ou seja, a frequência dos sinais dita a velocidade do motor.



Figura 4.3 - Drive existente no túnel de vento

Variador (8)

Um variador é um dispositivo capaz de gerar sinais de potência AC com a frequência e corrente para alimentar o motor ligado ao mesmo. O principal objetivo é permitir variar o campo magnético do motor e consequentemente a velocidade de rotação do mesmo.

O variador existente no túnel, *Freqrol A200* permite dois tipos de controlo, um por consola e outro por sinais externos. O sistema a criar utilizará o modo externo, que pode ser usado recorrendo a consola, podendo alternar entre modos externo ou consola. Por manipulação do parâmetro “79” do variador, este pode ser configurado para apenas permitir o modo pretendido, neste caso o externo. Este controlo é feito recorrendo a dois sinais, um sinal analógico, que dita a frequência do variador, e um sinal DC de 0V ou 24V, que irá ditar o sentido de rotação. Este pode ser no sentido de rotação dos ponteiros do relógio ou sentido de rotação contrário aos ponteiros do relógio. A conjugação dos dois sinais origina uma paragem ao motor.

4.1 Hardware

Para implementar a solução proposta houve a necessidade de realizar um levantamento de todas as entradas necessárias ao sistema bem como as saídas e o tipo de saídas necessárias. A Tabela 4.1 mostra as saídas necessárias para o material existente.

Tabela 4.1 - Lista de saídas necessárias

Objetivo	Tipo de saída	Número
Gerar os impulsos para as <i>drives</i>	Transístor	3
Controlo da direção e corrente das <i>drives</i>	Relé	6
Controlo variador (Sentido pretendido)	Relé	1
Controlo da velocidade do variador	Analógica	1

Quanto às entradas seriam necessários os componentes exibidos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Lista de entradas necessárias

Objetivo	Tipo de entrada	Número
Fim de curso	Relé	6
Sensor de pressão	Analógica	2

No entanto, por ação da necessidade de integrar o sistema PIV no túnel, iria ser adquirido/instalado um novo posicionador no topo do túnel. Para o efeito teriam de ser acrescentados dois controladores e fins de curso à lista de entradas necessárias.

Com base nestas considerações, seria necessário um autómato capaz de comandar 5 motores (5 de saída rápida e 10 de saída a relé), 2 entradas (dois sensores de pressão) e 1 saída analógica e com 10 entradas a relé para receber o sinal de 10 fins de cursos presentes no sistema.

Após uma pesquisa exaustiva aos produtos disponíveis no mercado nacional, deduziu-se que autômatos das marcas *Fatek*, *Siemens* e *Mitsubishi* constituem as escolhas mais vantajosas. Ao receber e analisar as propostas para autômatos dos fabricantes referidos, a mais vantajosa em termos económicos e de desempenho foi do fornecedor de autômatos *Fatek*, sendo adquiridos dois autômatos *Fatek*, pois a marca não dispõe de autômatos capazes de controlar mais de 4 motores em simultâneo. Assim, foram adquiridos um FBs-24MCJ2-AC e um FBs-20MCJ2-AC, com 14/10 e 12/8 entradas/saídas, respetivamente. No autômato com mais entradas/saídas, foi instalada a carta com 2 entradas analógicas e 1 saída analógica, bem como a carta de comunicação (Ethernet/RS485/RS232). Para comunicar com o segundo autômato, foi necessário adquirir uma carta de comunicação RS485 para o autômato dois. Recorreu-se à carta de comunicação pois esta reproduz os dados recebidos na sua porta Ethernet para a RS485. Recorrendo ao protocolo *Modbus* é possível comunicar com os dois autômatos desde que as mensagens sejam endereçadas à estação correta. Um dos pontos que se teve em maior consideração no decorrer das configurações dos autômatos foi a estação dos mesmos ser diferente, sendo atribuída a estação 2 ao autômato 1 e a estação 3 ao autômato 2. A estação 0 está reservada ao master do sistema, neste caso o computador. Deste modo, os autômatos foram configurados para tal, tendo em conta que normalmente as saídas são saídas a relés, usou-se um autômato que possui 4 saídas a transístor, permitindo assim controlar 4 motores de passo sem danificar as saídas do mesmo. Para o controlo de uma *drive* foram utilizadas 2 saídas do autômato, uma gera o sinal de pulsos (saída a transístor) e a outra controla a direção.

4.2 Sistema de Posicionamento Interno

Relativamente ao controlo do sistema de posicionamento interno, a primeira etapa consistiu na obtenção dos dados do *joystick*. Para tal, foi necessário instalar um microcontrolador, uma vez que a leitura dos dados usando o autômato teria custos elevados, como já foi referido anteriormente. O processo de seleção do microcontrolador para o sistema iniciou-se com a análise das características necessárias, como é o caso das portas de comunicação, ADC, entradas/saídas digitais, entre outros. Após o levantamento das características, apenas uma delas teve relevância na escolha. O microcontrolador em questão tem de ter duas portas RS232, pois será necessário criar dois mecanismos distintos de envio. Ao escolher o microcontrolador houve também a necessidade de garantir que existiam duas ADC disponíveis. A gama de tensões de operação para a aplicação em questão não teve influência na escolha. A seleção recaiu sobre o microcontrolador

PIC18F45K22 por ser, de entre o material disponível, o que contém as características necessárias e melhor se enquadra para a aplicação a desenvolver.

Desde o início do programa até ao programa final, pronto a recolher os dados das ADC e a compará-los com os valores padrão e de seguida enviar via RS232 e RS232-Modbus para o computador e o autómato, respetivamente, o código passou por várias fases. Começou por se criar o programa em linguagem C, para a comunicação entre o computador e o microcontrolador. Este programa recebe dados do terminal do computador e, via RS232, transmiti-los para o microcontrolador, que iria devolver o carácter recebido.

Existem duas possibilidades para fazer a receção e reenvio dos dados, inicialmente optou-se pelo modo mais simples, porém, menos eficaz. No *main* do programa inseriu-se um “if” que vê se a *flag* de receção (RCxIF) foi ativada. Se tal acontecer, é executado o ciclo “if” e será reenviada, pela porta de saída (TXREGx) do microcontrolador, a informação que foi recebida (RCREGx). Este método é o menos eficaz pois, caso o programa seja muito extenso e esteja a realizar outra operação demorada, pode levar à perda de dados recebidos, quando esteja a ser enviado, continuamente, um grande fluxo de dados. O primeiro método foi utilizado para auxiliar e facilitar a deteção de erros de configuração. No decurso desta fase ocorreu um problema de compatibilidade entre o computador e o PICKIT (ferramenta usada para programar o microcontrolador). O microcontrolador envia a informação pelas suas portas de comunicação (USART) por intermédio de níveis TTL. Estes níveis não são aceites, nem pelo autómato, nem pelo conversor ligado ao computador. Assim, ocorreu a necessidade de instalar uma max232, que irá converter os valores TTL em níveis determinados no protocolo EIA-232 (níveis usados pelo autómato e conversor do computador).

Seguidamente implementou-se o método mais eficaz. De modo a receber informação através da USART, recorreu-se às interrupções, ou seja, sempre que uma *flag* listada como interrupção seja ativada, o programa é parado e forçado a ir para a função que gere as interrupções. Será então tratada a interrupção antes de voltar ao ponto onde o programa foi parado anteriormente. Nesta fase, o programa deixou de estar dependente do *main* ou do tamanho do código. Sempre que recebe informação, esta será guardada num *array* e, quando o microcontrolador estiver disponível, irá tratar a informação recebida, evitando assim a perda da mesma. Estando configurada a porta USART e a enviar os dados, procedeu-se à configuração das ADC, que irão adquirir os valores dos potenciómetros do *joystick*. De seguida, recorrendo a uma função da biblioteca do microcontrolador, “printf”, procedeu-se ao envio desta mesma informação para o terminal do computador.

A leitura das ADC e o seu envio está associada a um temporizador de período 20ms. Este temporizador ativa a sua *flag* no período definido, que por sua vez irá gerar uma interrupção. Na interrupção muda-se o estado de uma variável e reinicia-se o *timer*. Quando o programa chegar à zona de envio, estando a variável ativa, é iniciada a leitura das ADC. Usando ADC do microcontrolador, irá adquirir-se a posição do *joystick* e classificar esta de 1 a 5. Esta gama foi definida dividindo a zona de operação do *joystick* em 5 zonas, o que permite assim, ter duas gamas de velocidade num dado sentido e uma zona de repouso. Na Figura 4.4 é possível observar uma mensagem completa codificada em hexadecimal. Também é possível observar a mudança que ocorre na mensagem quando se move o *joystick*.

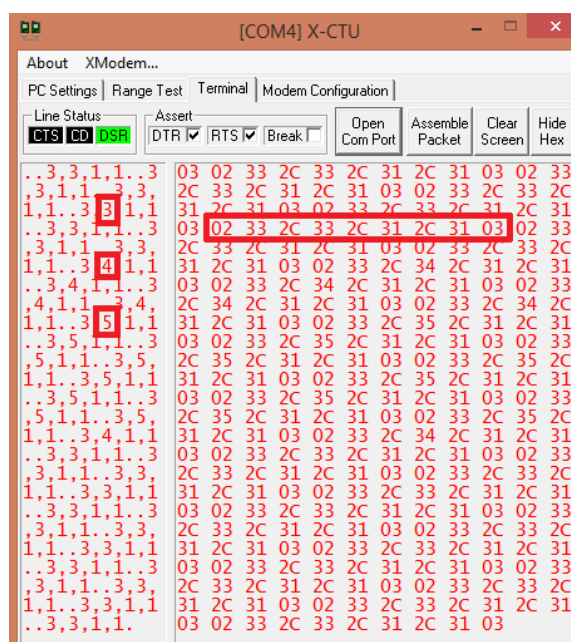


Figura 4.4 - Informação recebida do Microcontrolador

De seguida foi efetuado o envio pela porta serie para o computador, usando a função “printf”. Ao testar o envio da informação verificou-se que as mensagens estavam de acordo com o configurado e que não continham erros. Estando confirmado o funcionamento da primeira porta, foi configurada a segunda porta USART e criaram-se as funções para que a informação anteriormente enviada para o computador fosse enviada para o autómato, mas codificando a mensagem com o protocolo *Modbus*. Para testar as configurações do autómato, começou por se enviar uma mensagem para ativar/desativar uma saída do autómato. Seguidamente testou-se a função para o cálculo do CRC. Estando a função que calcula o CRC de acordo com as regras do *Modbus*, alterou-se o código para escrever nas memórias retentiva (R) do autómato a informação dos botões e da posição do *joystick*.

Este código foi todo testado usando o terminal do Windows ou escrevendo no autômato e verificando a escrita recorrendo ao *software WinProladder*. Após a configuração do envio da informação, tornou-se possível dar início à aplicação e à conceção das funções que irão receber a informação vinda do microcontrolador, ou pedir ao autômato a informação.

A Figura 4.5 mostra o esquema elétrico com os componentes descritos até ao momento, a alimentação do microcontrolador, as ligações do microcontrolador e max232.

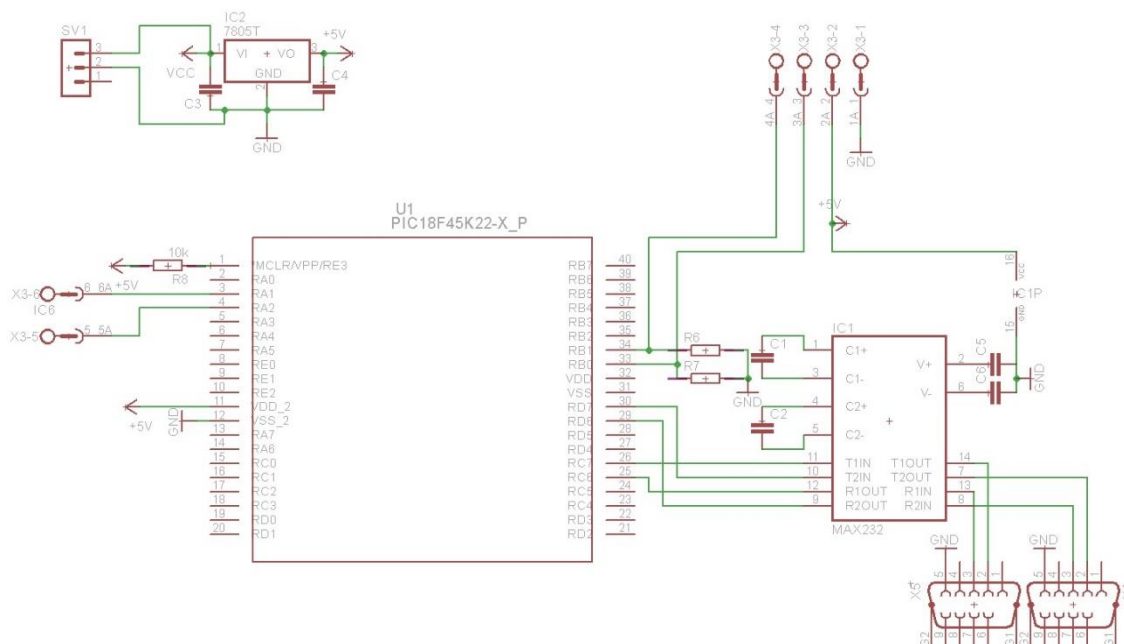


Figura 4.5 - Esquema de ligações do microcontrolador

Para criar a aplicação, começou por se criar um programa em linguagem *Visual Basic* capaz de receber informação via RS232, para tal usou-se o objeto *SerialPort* disponível na *Microsoft Visual Studio 2013*. Este objeto permite criar uma ligação RS232, fazendo as configurações deste objeto, como a porta da conceção, paridade, *stop bits*, taxa de transmissão e o número de bits usados (*Data bits*, Figura 7.4). Estando as configurações feitas e iguais às do microcontrolador, é possível receber mensagens do mesmo. Atualmente, como as mensagens são enviadas em intervalos de 20ms com codificação ASCII é impossível a aplicação saber se, quando o microcontrolador envia uma mensagem, esta já acabou ou se falta informação. Como tal usaram-se dois caracteres da tabela ASCII, nomeadamente, o "Start of text" e "End of text". Estes caracteres são enviados para o programa detetar quando começa a mensagem e se o microcontrolador já terminou de enviar toda a informação. Caso contrário, poderia levar o programa a processar informação incompleta, o que levaria a erros. Nesta mensagem é enviada toda a informação sobre a posição do *joystick* e o estado dos botões, sendo esta informação separada por vírgulas, para facilitar o processamento da mesma, usando as funções disponíveis nas bibliotecas do *C Sharp*. Qualquer outro carater podia ser

escolhido, desde números a letras, mas para facilitar os testes e interpretação da informação, escolheu-se a vírgula.

Como é possível desconfigurar o joystick, quando este não está a ser utilizado deve-se encontrar na posição de repouso. Caso contrário poderá surgir a necessidade de se calibrar o joystick através do envio de um conjunto de caracteres que serão recebidos no microcontrolador que, por sua vez, procede ao envio de outros valores. Estes novos valores são a leitura direta das ADCs em vez dos valores tratados pelo microcontrolador. Recorrendo à aplicação, que irá pedir ao utilizador para deixar o joystick na posição de repouso e de seguida calibrar os potenciômetros, fica o processo concluído (Figura 7.5). Estando o joystick calibrado fecha-se a janela de calibração e volta-se ao normal funcionamento do sistema.

Na Figura 4.6 encontra-se o esquema que demonstra o caminho que a informação pode percorrer para chegar até a aplicação.

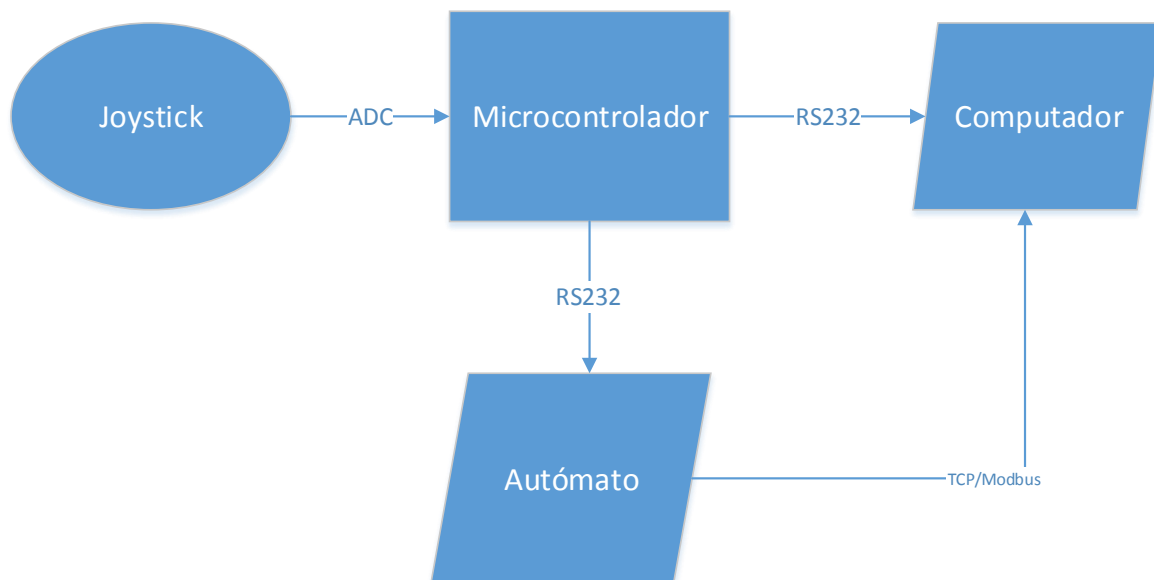


Figura 4.6 - Esquema da leitura/envio da informação do joystick

Para evitar que a informação seja enviada do microcontrolador para o computador e de seguida para o autômato, usou-se a informação recebida diretamente do microcontrolador para fazer o controlo manual do posicionador interno. Para tal, criou-se uma sub-rotina no autômato que irá mover o posicionador, que é ativada apenas quando a memória M550 é ativada. A forma como se ativa memórias ou se lê/escreve informação no autômato será abordada no subcapítulo 4.5. Quando M550 é ativada, o controlo manual do posicionador está ligado e o programa compara os valores recebidos do joystick com as suas definições de movimento. Quando os valores mudam, são comparados e, consoante esta mudança, a instrução de movimento será dada. Cada instrução de movimentos tem uma velocidade diferente ou sentido diferente. Não foi possível usar a mesma

instrução pois o autómato não aceita que se realizem mudanças de velocidade com movimentos a decorrer e devido às rampas de aceleração/desaceleração do motor, para usar a mesma instrução seria necessário esperar, criando tempos de espera entre a mudança de velocidade/sentido. Apesar de este método consumir mais memória do autómato, garante um bom funcionamento dos motores. A aplicação continua a ser utilizada para a calibração e, em caso de a ligação ao autómato se danificar, continua-se a ter uma ligação de *backup*.

Foi também implementado um modo automático, onde o utilizador introduz a posição desejada e o programa irá comparar a posição atual e, de seguida, dar ordens ao motor para se mover para a posição desejada. A Figura 4.7 mostra a aplicação criada, onde é possível ver a posição atual e onde é introduzida a posição desejada.



Figura 4.7 - Aplicação do controlo do eixo interior

Para dar a ordem de movimento basta ao utilizador confirmá-la e premir “OK”. O programa verifica quais as posições que sofreram movimento, de seguida transmite ao autómato a nova posição desejada e dá ordem para que o autómato calcule os pulsos necessários a atingir esta posição. O programa apenas dá ordem para que sejam efetuados cálculos e sejam movidos os eixos necessários, os que não sofrerem alterações não recebem ordens de alteração. Este modo foi criado para permitir ao utilizador, depois de usar o modo manual, repetir a mesma posição vezes sem conta, numa outra utilização, não sendo restringido a usar o modo manual.

Como referido no capítulo 3.1 o funcionamento das *drives* requer dois sinais para executarem o movimento. Para controlar as *drives* foram usadas funções existentes na biblioteca do autómato, nomeadamente as funções especiais para controlo de motores de passo. Recorreu-se a duas funções para o movimento dos motores, a função “MPARA” e a função “HSPSO”. “MPARA” lê as configurações presentes na tabela de configuração dada, esta pode ser configurada recorrendo à “Servo Parameter Table”, que pode ser observada na Figura 4.8. Esta tabela gravada no autómato

permite saber as definições do motor, como a frequência máxima, número de pulsos por revolução, rampas de aceleração/desaceleração, entre outros.

Figura 4.8 - Tabela de configuração dos parâmetros do motor

Cada motor tem uma tabela de configuração associada, o autômato ao iniciar ativa uma memória, M1924. Esta é apenas ativada uma vez durante o programa todo, apenas quando o autômato é ligado, logo é a memória mais adequada para indicar as configurações dos motores ao autômato. A outra função usada é o “HSPSO”, quando ativada esta permite mover o motor. De forma análoga ao “MPARA”, é necessário configurar o número de pulsos pretendidos e o sentido do movimento. Estes podem ser alterados com o programa em funcionamento, mas não com a função em funcionamento.

Figura 4.9 - Tabela usada pela função HSPSO

Outra utilidade da função é fazer o zero do sistema recorrendo à instrução DRVZ, presente na Figura 4.9. Esta permite, em conjunto com as configurações do “MPARA”, por o sistema na posição zero do mesmo, o que evita problemas ao utilizador. Esta função é útil, pois o sistema não tem codificadores (*encoders*) instalados. Logo, o utilizador pode mover o posicionador manualmente estando o sistema desligado, o que levaria a erros quando o sistema fosse reiniciado e o programa utilizasse as últimas configurações guardadas. Para evitar tal erro, quando os autómatos são iniciados, fazem o zero ao sistema.

Estando o modo automático configurado e funcional, todos os elementos do modo manual criados e configurados, fica apenas a faltar criar a aplicação capaz de controlar os programas dos autómatos.

No entanto, devido à sua antiguidade, um dos motores presentes sofreu um enrolamento queimado durante os ensaios. Ao analisar os preços de um motor novo igual, chegou-se à conclusão que seria melhor obter um motor novo juntamente com a sua *drive*, ficando assim com dois componentes novos. Foram adquiridos um motor *RTA.103H7126-6640* e uma *drive NDC 06.V* da *R.T.A*

4.3 Sistema de Posicionamento Externo

O posicionador para movimentar o laser do PIV não estava presente no início do trabalho, pois os mesmos teriam de ser adquiridos. Para tal realizou-se uma pesquisa dos guias lineares disponíveis no mercado. Foram solicitados orçamentos às empresas Igus e ISEL Automation. A opção final recaiu sobre a Igus por esta ter representante em Portugal, o que permitiria obter ajuda em caso de avaria e devido ao curto prazo para a obtenção do material. Foram adquiridas três mesas lineares: duas iriam ser apoiadas nas extremidades do túnel, ao longo do eixo X (longitudinal, paralelo ao escoamento), e outra para o eixo Y (transversal) seria apoiada nas duas mesas do eixo X como mostra a Figura 4.10.

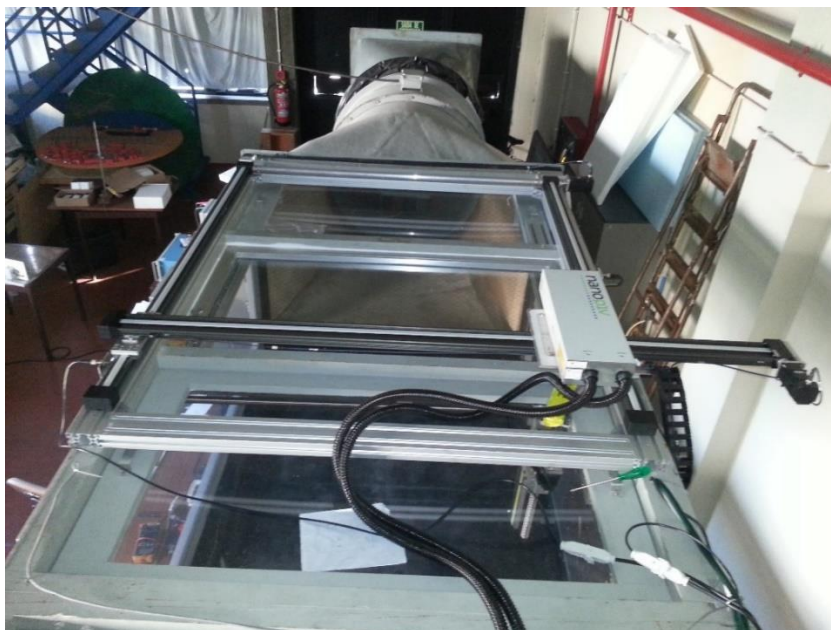


Figura 4.10 - Eixo Superior

O dimensionamento dos motores foi feito pela Icus, a cargo do autor ficou escolha da *drive* de controlo dos motores. O motor sugerido pela Icus foi o NEMA23XL, com um binário de 3,5Nm e corrente nominal de 4,2A. Foi procurada a *drive* do fabricante do motor, SMCI36, mas devido a esta ser mais cara, optou-se por usar uma drive igual à já instalada no túnel (NDC 06.V) para controlar o motor do eixo Y interno.



Figura 4.11 - Drive NDC 06.V

Mediante a sua configuração, a *drive* (Figura 4.11) conjugada com a posição dos *DIP switch* 1, 2, 3 (Figura 4.12), permite obter um máximo de 6A de corrente. Como os motores presentes têm uma corrente máxima de 4,2A, definiu-se a corrente máxima da *drive* para 3,6A. Este valor permite

controlar todo o sistema sem problemas. No entanto, também seria possível a *drive* fornecer 4.3A ao motor, um valor dentro da margem de segurança do mesmo e que forneceria mais binário ao sistema.



Figura 4.12 - DIP switch da drive

Como a estrutura do túnel está um pouco empenada, optou-se por incorporar um perfil em alumínio entre as guias lineares e a estrutura do túnel. Este perfil terá algumas vantagens para toda a montagem, pois irá garantir o paralelismo das guias no eixo X bem como facilitar o posicionamento dos fins de curso. Pode existir a necessidade de mover os fins de cursos para ajustar o comprimento do curso que o laser do PIV realiza, os mesmos foram fixados ao perfil (Figura 4.13).

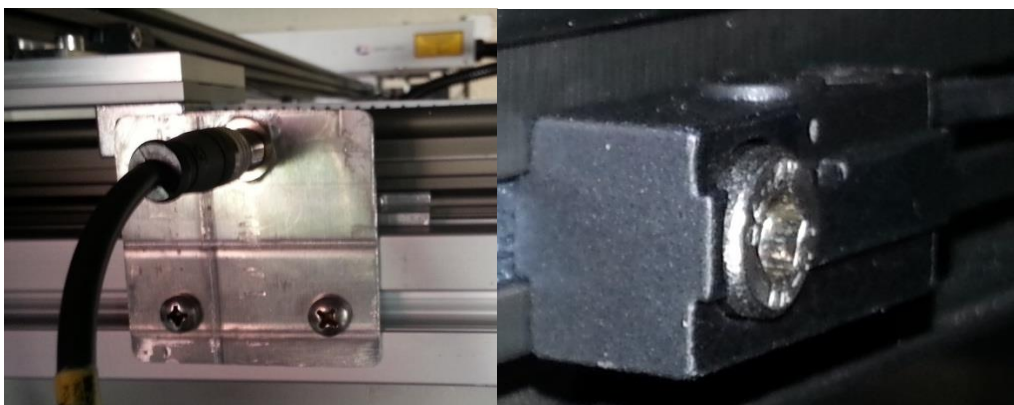


Figura 4.13 - Sensor Indutivo do eixo X e Y

Podendo os mesmos ser movimentados, houve a necessidade de criar um sistema tanto na aplicação como no autómato capaz de obter estes novos comprimentos e converter para a escala apropriada. Para que o utilizador não seja obrigado a realizar esta operação de calibração sempre que inicia o sistema, os valores da calibragem foram guardados nas memórias retentivas (R), estas mantêm a informação mesmo depois de ser desligado o autómato. Assim o autómato é capaz de saber os valores para cada eixo sempre que é iniciado e estes valores indicam os máximos que cada eixo no posicionador superior pode atingir. Caso o utilizador indique um valor superior, o programa não permitirá iniciar o movimento. Para tal no menu de “Opções” adicionou-se “Configuração Eixo Superior”. A interação do sistema com a aplicação será explicada no capítulo 4.5.

Para movimentar o posicionador recorreu-se a uma programação muito semelhante à do eixo interior, pois são usadas as mesmas funções para posicionar as carruagens. Estas foram criadas e adicionadas a restrições necessárias, como em caso de uma má configuração e caso seja atingido

um fim de curso, o programa pára o movimento do eixo. Como o laser PIV tem instalado óticas na sua extremidade e existe a possibilidade de as mesmas colidirem com a estrutura do túnel, por segurança não foi adicionado a este posicionador a possibilidade de o mesmo ser posicionado manualmente com *joystick*.

4.4 Variador de Frequência

Depois de implementado a parte de comunicação entre os dispositivos, a próxima fase passou pelo controlo do variador instalado no túnel e pela aquisição da pressão diferencial no seu interior. Estes dois processos foram feitos em conjunto devido à ligação entre o variador e a velocidade do escoamento no túnel de vento.

Começou-se por adquirir a velocidade do escoamento. Não havendo a possibilidade de a mesma ser medida diretamente, tal como descrito no estado da arte, recorreu-se à equação de Bernoulli. Para calcular a velocidade do escoamento segundo esta formulação, é necessária a pressão total medida no tubo de Pitot.

Antes de escolher o sensor foi necessário calcular a pressão máxima a que o mesmo estaria sujeito bem como a resolução do manómetro, pois o sensor deve ter a mesma resolução ou maior.

Tendo o motor a rodar à frequência de 60Hz, a pressão resultante é 7,5 mmH₂O e o manómetro tem uma resolução máxima de aproximadamente 0,025mmH₂O. No entanto, é possível medir uma velocidade maior no túnel de vento, 12m/s ou uma diferença de pressão de 9 mmH₂O, esta velocidade obtém-se com o motor a frequências mais altas e é o limite, pois a frequências mais altas não é possível medir um valor concreto com o manómetro devido às flutuações significativas associadas. Desta feita, seria necessário encontrar um sensor capaz de ler uma diferença de pressões de 88 Pa (9mmH₂O) com resolução de 0,25 Pa (0,025mmH₂O) ou maior.

Adquiriu-se um sensor de pressão *SENSIRION SDP1000-L05*, com resolução típica de 0,1 Pa, capaz de ler valores de pressão de 0 Pa a 125 Pa, com sinal de saída de 0,25V a 4V.

Como a carta analógica do autómato lê no máximo de 10V de tensão na sua ADC, decidiu-se criar um circuito amplificador de diferença com um ganho de 2,7, isto deve-se ao facto de o sinal de saída nunca chegar ao máximo da capacidade do sensor e o autómato ter uma ADC com 10V (12 bits de resolução) de valor máximo de leitura. A figura seguinte mostra o esquema criado para o efeito e todos os componentes usados, sendo o sensor ligado a SV1-5.

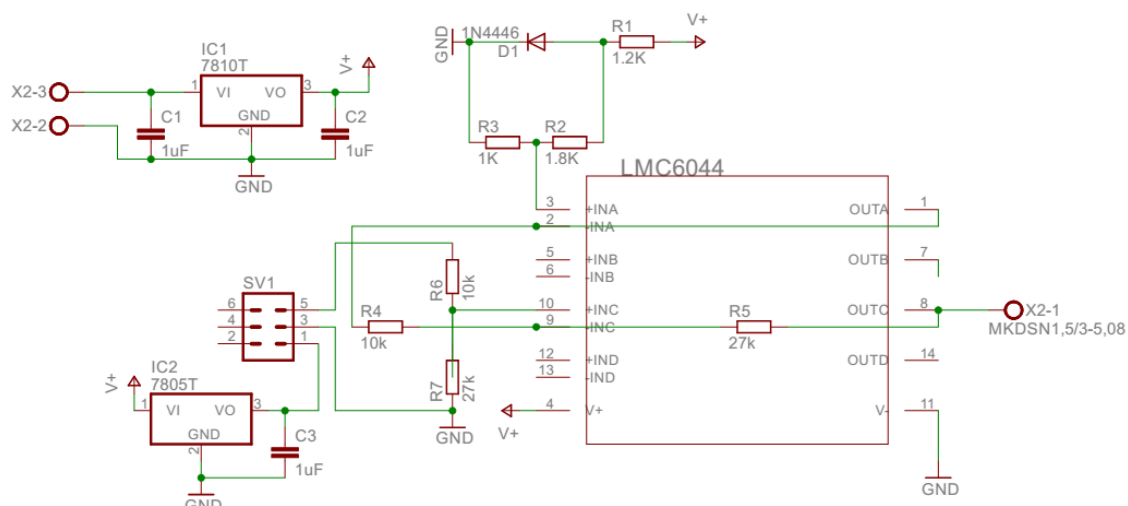


Figura 4.14 - Esquema de ligações da placa de amplificação do sensor de pressão

A alimentação deste circuito foi feita recorrendo a um 7810, pelo facto de a tensão máxima suportada pelo autómato ser de 15V, acautelando assim que, com uma avaria ou pico do sistema, as entradas não serão danificadas, pois este regulador nunca fornece mais de 10V. Sendo a tensão de alimentação do sensor 5V, ligado a SV1-1, foi também necessário instalar uma fonte de tensão de 5V. Como o mesmo é sensível a variações da tensão de entrada, recorreu-se ao manual do mesmo e verificou-se as sugestões de fontes de alimentação/esquema para o mesmo. No manual é sugerido o regulador LP2980. O circuito exemplo tem um amplificador operacional (OpAmp) sugerido. Depois de analisar o mesmo verificou-se que este é um bom OpAmp para o efeito pretendido, pois é *rail-to-rail* à saída. Não se usou o esquema sugerido, pois é necessário um pouco mais de ganho (A_v).

A Figura 4.15 mostra o circuito criado já montado em placa *breadboard* para simulação do mesmo e confirmação dos resultados esperados.



Figura 4.15 - Breadboard do sensor e circuito de amplificação

Estando este circuito criado e montado procedeu-se à leitura do mesmo no autómato, para tal ligou-se a carta analógica à saída do autómato.

Uma vez efetuadas as ligações, houve a necessidade de realizar testes para comparar os resultados obtidos pelo novo sensor com o manómetro usado nos testes até ao momento no túnel de vento. Instalaram-se dois tubos de Pitot, lado a lado, na secção de testes do túnel de vento com vista a medirem a diferença de pressões em duas posições muito próximas do escoamento, permitindo assim uma boa comparação de resultados, a figura seguinte mostra a montagem dos mesmos no túnel de vento.

O manómetro ficou ligado ao tubo de Pitot 1 e o sensor de pressão ficou ligado ao tubo de Pitot 2, como mostra a figura seguinte



Figura 4.16 - Tubos de Pitot usados na experiencia

O manómetro (Figura 4.17a) existente tem três posições de medida (Figura 4.17b), cada uma indicada para diferentes gamas de pressão a medir.



Figura 4.17 - a) Manómetro b) Posições disponíveis no manómetro para medir

Estando o manómetro devidamente calibrado e pronto a usar, ligou-se o variador do túnel de vento e fez-se variar a frequência de 5 em 5 Hz, a cada variação foram registados os valores de pressão no manómetro e no autómato, à saída do circuito de amplificação.

Na primeira experiência registou-se diretamente os valores lidos da porta analógica. No seu decurso notou-se que a variação era demasiado rápida para conseguir ler um valor específico, pelo que foram registados valores médios nestas situações. A primeira experiência deu-se na posição três (mais elevada) do manómetro, esta posição faz com que se tenha de incluir um fator multiplicativo de escala de 0.2 no cálculo da velocidade.

Tabela 4.3 - Terceiro Nível do Manómetro (Fator de 0,2)

f (Hz)	Pitot 1 (Clássico)		Pitot 2 (Digital)			
	dP (mmH ₂ O)	v (m/s)	V_autómato	dP(Pa)	dP(mmH ₂ O)	v (m/s)
0	0	0	0	0	0	0
5	0,8	1,6	28	0,2110	0,0215	0,59
10	1,8	2,4	260	1,9596	0,1998	1,79
15	3,5	3,35	680	5,1252	0,5226	2,89
20	5,7	4,27	1270	9,5720	0,9761	3,95
25	9	5,37	2000	15,0741	1,5371	4,96
30	12,7	6,37	2950	22,2343	2,2672	6,02
35	17	7,38	4020	30,2989	3,0896	7,03
40	22,8	8,54	5280	39,7956	4,0580	8,06
45	28,5	9,55	6660	50,1967	5,1186	9,05
50	35	10,58	8250	62,1806	6,3406	10,07

Devido às flutuações muito rápidas (escoamento turbulento e desgaste do motor), optou-se por uma média com dez valores, os mesmos lidos de 0,1 em 0,1 segundos. Esta média permitiu obter valores mais próximos do esperado e mais corretos.

Tabela 4.4 - Segundo Nível do Manómetro (Fator de 0,1)

f (Hz)	Pitot 1 (Clássico)		Pitot 2 (Digital)			
	dP (mmH ₂ O)	v (m/s)	V_autómato	dP(Pa)	dP(mmH ₂ O)	v (m/s)
0	0	0	0	0	0	0
5	0,8	1,13	38	0,2864	0,0292	0,68
10	2,9	2,15	275	2,0727	0,2114	1,84
15	6	3,10	681	5,1327	0,5234	2,89
20	11	4,20	1256	9,4665	0,9653	3,93
25	17,8	5,34	2022	15,2399	1,5540	4,99
30	25,7	6,41	2910	21,9328	2,2365	5,98
35	35	7,48	4052	30,5401	3,1142	7,06
40	45,5	8,53	5263	39,6675	4,0449	8,04
45	58,5	9,67	6678	50,3324	5,1324	9,06
50	72	10,73	8295	62,5198	6,3751	10,10

Na Tabela 4.5 pode-se observar o teste do sensor de pressão e do manómetro com a sua maior resolução.

Tabela 4.5 - Terceiro Nível do Manómetro (Fator de 0,05)

f (Hz)	Pitot 1 (Clássico)		Pitot 2 (Digital)			
	dP (mmH ₂ O)	v (m/s)	V_autómato	dP(Pa)	dP(mmH ₂ O)	v (m/s)
0	0	0	0	0	0	0
5	0,5	0,63	39	0,2939	0,0300	0,69
10	4,8	1,96	273	2,0576	0,2098	1,83
15	12	3,10	674	5,0800	0,5180	2,88
20	21,5	4,15	1240	9,3459	0,9530	3,90
25	34,5	5,25	1997	15,0515	1,5348	4,96
30	50	6,32	2915	21,9705	2,2403	5,99
35	69,5	7,46	3994	30,1030	3,0696	7,01
40	92	8,58	5245	39,5318	4,0311	8,03
45	118,5	9,74	6639	50,0384	5,1024	9,04
50	148	10,88	8165	61,5400	6,2752	10,02

Tendo como base as tabelas anteriores, no Gráfico 4.1 pode ser observado o comparativo das medições com manómetro e sensor com os valores teóricos do túnel.

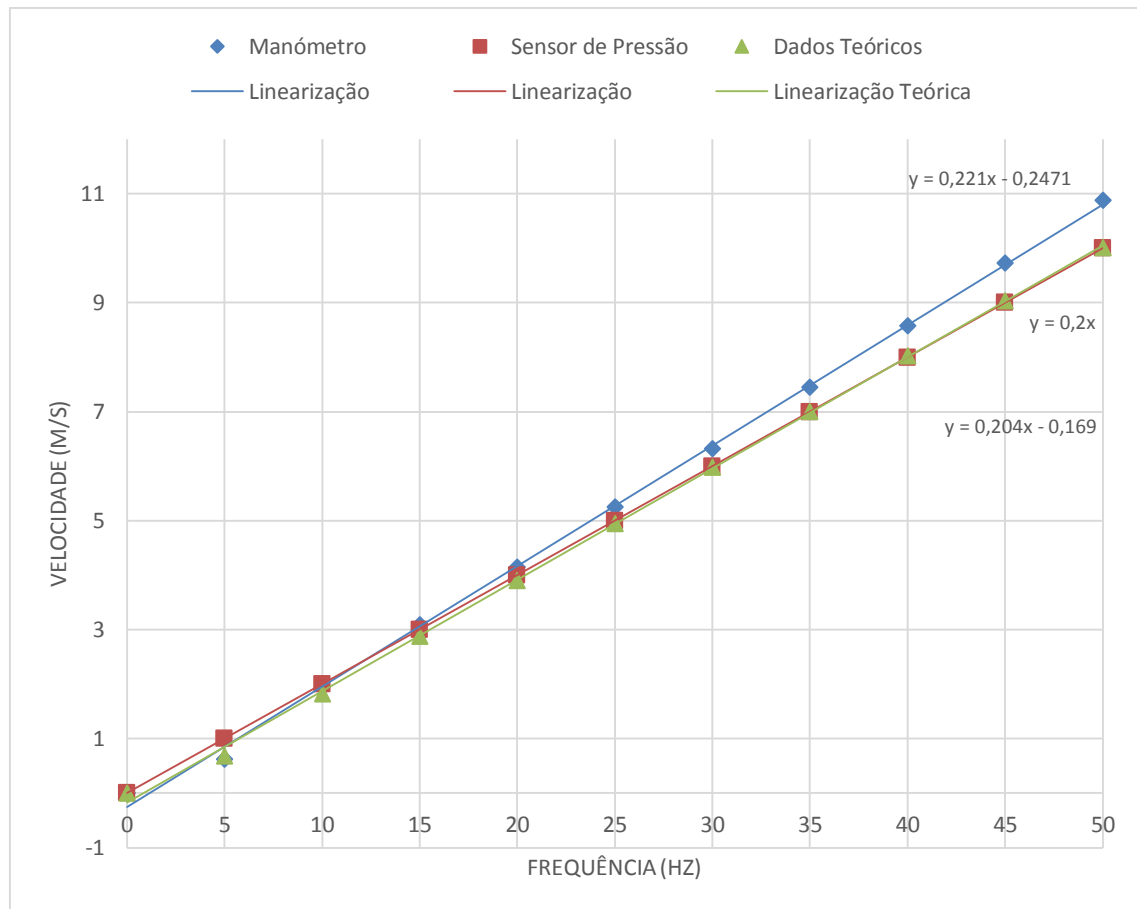


Gráfico 4.1 - Comparação das relações velocidade/frequência da experiência

O passo seguinte foi proceder-se à ligação entre o automático e o variador, de modo a poder controlar-se o variador a partir do automático. A Figura 4.18 mostra o esquema elétrico do variador.

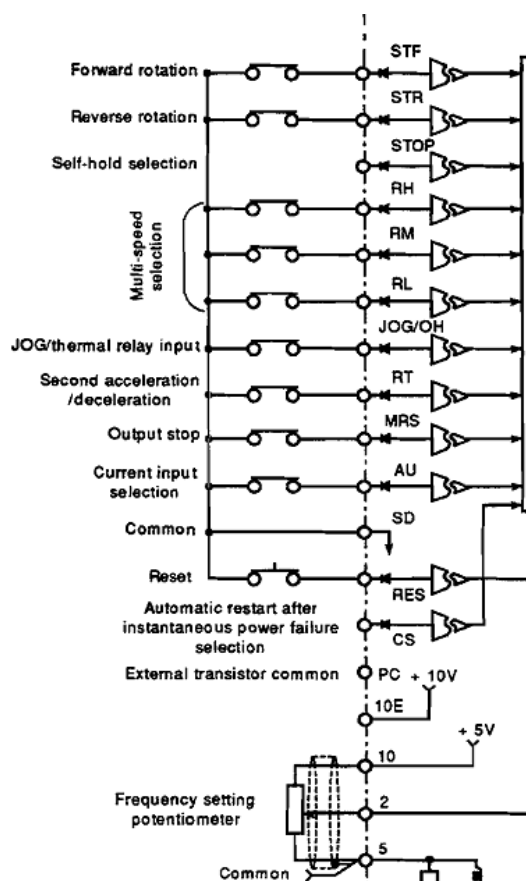


Figura 4.18 - Esquema interno do variador

O variador responde a sinais de 24V, para tal, ligaram-se as massas do variador à massa do quadro elétrico. Recorrendo ao manual foi possível observar que o pino para efetuar esta ligação é o SD. O pino 2 do variador, que permite controlar a sua frequência recorrendo a uma tensão de 0 a 5 V, foi ligado à saída analógica do autómato.

De seguida, implementou-se um controlador PID para garantir a estabilização do sistema, sendo definido para atuar em intervalos de tempo de 30 ms. Optou-se por este intervalo pois existe a necessidade de deixar o sistema estabilizar devido à natureza do sensor de pressão e do tubo de Pitot. Estando estabilizado pode verificar-se o efeito do PID e de seguida atuar, caso se justifique. Ao ler o valor de tensão no sensor, este pode ser convertido em pressão, em Pascal. Na perspetiva de facilitar a utilização do sistema por parte de um utilizador habituado a lidar com valores de pressão, decidiu-se comparar o valor desejado e o lido em pressão. O utilizador insere a velocidade desejada na aplicação e, recorrendo a fórmula de Bernoulli, traduz-se a velocidade numa diferença de pressão.

Recorreu-se às seguintes fórmulas aplicadas ao controlador PID, em que $u(t)$ é a saída do controlador e $e(t)$ é o erro nesse instante (HaberBars& Schmitz, 2012).

$$K_1 = K_p + K_i + K_d$$

$$K_2 = -K_p - 2 \cdot K_d$$

$$K_3 = K_d$$

$$u(k) = u[k - 1] + K_1 \cdot e[k] + K_2 \cdot e[k - 1] + K_3 \cdot e[k - 2]$$

Os valores de K_p , K_i e K_d foram obtidos experimentalmente e implementados no autómato, sendo usados 50, 1,5 e 5, respetivamente.

Tendo o valor da saída a calcular, o controlador PID está concluído. No entanto, aquando da realização de experiências, o PID vai tentar chegar ao valor pedido, quando tal acontece o controlador é parado e fica com o último valor a atuar sobre o sistema, permitindo assim ao utilizador realizar as experiências sem que a velocidade seja alterada pelo PID. Com este conjunto de instruções o controlo do inversor deu-se por concluído.

4.5 Aplicação Gráfica

Como referido anteriormente a aplicação começou a ser criada em *Visual Basic*, quando se estava a desenvolver o controlo do posicionador interno, a mesma começou por apenas ser capaz de receber os dados do *joystick*. A Figura 4.19 exhibe a aplicação inicial, antes de se adicionar todo o controlo sobre o autómato por parte da aplicação via *Modbus*.



Figura 4.19 - Primeira versão da aplicação

Para controlar o movimento do autómato, é necessário ativar memórias ou escrever informação nos registos do mesmo. Como referido anteriormente, recorreu-se ao protocolo *Modbus* via Ethernet. Como a *Fatek* não disponibiliza bibliotecas, recorreu-se a uma biblioteca *online*. Esta permite criar automaticamente a ligação ao autómato, de qualquer marca, e enviar as mensagens

Modbus via Ethernet. É uma biblioteca livre de usar (*Open Source*) de acordo com o site CodeProject (Stricker, 2006). Na respetiva página é fornecido um programa para ajudar o utilizador a ligar um autómato ou outro aparelho que opere com *Modbus* sobre *Ethernet*. O programa foi usado para permitir confirmar que as configurações do autómato estavam de acordo com o protocolo, estando ambos os autómatos bem configurados. Confirmadas as configurações deu-se início à integração da biblioteca, bem como todas as rotinas necessárias para a mesma funcionar. A biblioteca foi desenhada para funcionar em ambiente *C Sharp (C#)*, o que levou a que o programa tivesse de ser reescrito na nova linguagem. A aplicação foi replicada para ficar igual à exibida na Figura 4.19 tanto em aspeto, como em função. O programa foi testado com o *joystick* para garantir que estava tudo em funcionamento.

De seguida inseriu-se no novo programa na biblioteca, ficando a mesma pronta a usar. Como o programa do autómato já estava pronto e testado via *WinProladder* (software da *Fatek* usado para programar os seus autómatos), bastando apenas receber a informação da posição desejada na posição correta da memória e, de seguida, dar ordem de início do movimento, o controlo dos posicionadores foi rapidamente terminado.

Para precaver eventuais avarias do *joystick*, foram adicionados à aplicação 5 botões ativados por teclado para simular o *joystick* (Figura 4.20).

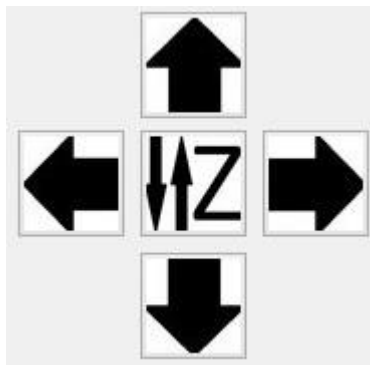


Figura 4.20 - Botões de simulação do controlo manual

Ao premir uma das teclas seta, o movimento do eixo correspondente é iniciado e, ao levantar o dedo, o movimento pára. Para o botão o funcionamento é o mesmo, clicando inicia o movimento, clicando de novo este movimento pára. Com este sistema o movimento manual fica salvaguardado, permitindo ao utilizador do programa posicionar sondas manualmente caso deseje.

De seguida adicionou-se mais dois grupos de controlo, o controlo da velocidade e do posicionador externo. Como a base de controlo já esta toda criada, bastou adicionar os novos itens que permitam controlar a velocidade e o posicionador.

Para o controlo do eixo superior, adicionou-se mais uma zona de configurações. Esta estará oculta até se iniciar a configuração do eixo superior. Ao iniciar irá surgir (Figura 4.21) uma zona de configuração. Esta tem um botão (Start) para iniciar todo o processo.

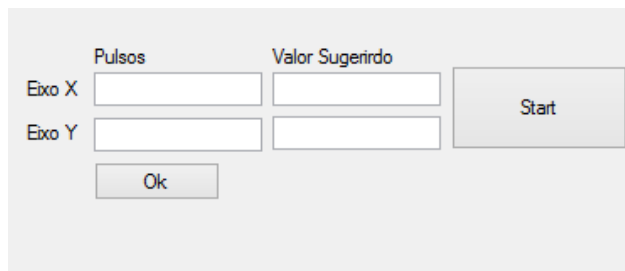
A interface de configuração do eixo superior é apresentada numa janela com fundo cinza. No topo, há duas colunas de cabeçalho: "Pulsos" e "Valor Sugerido". Abaixo destas, há duas linhas de entrada. A primeira linha, rotulada "Eixo X" à esquerda, contém um campo de texto para "Pulsos" e um campo de texto para "Valor Sugerido". A segunda linha, rotulada "Eixo Y" à esquerda, também contém campos de texto para "Pulsos" e "Valor Sugerido". À direita destes campos, há um botão cinza com o texto "Start". Abaixo dos campos de entrada, há um botão cinza com o texto "Ok".

Figura 4.21 - Zona de configuração do eixo superior

Ao iniciar o processo, irá ser enviada para o autómato a ordem para iniciar duas funções “HSPSO”, estas irão gerar impulsos até às carruagens chegarem aos fins de curso no fim do eixo. Estando este valor obtido pode então dar-se início à configuração. De seguida, um valor é sugerido ao utilizador, cabe a este aceitar ou introduzir outro. No entanto, se este for superior ao valor de pulsos necessário para chegar ao fim de curso, irá induzir o sistema em erro o que impossibilita ao utilizador usar a escala completa bem como a resolução máxima do sistema. Estando o valor definido, o programa guarda a variável para poder apresentar a escala correta ao utilizador e envia para o autómato as posições destinadas à conversão. No autómato este valor será usado para, quando o utilizador pedir uma nova posição, ser calculado o número de pulsos necessários para chegar à posição desejada.

Caso o utilizador já tenha realizado esta operação numa utilização anterior, ao iniciar a comunicação *Modbus* via *Ethernet* o programa irá pedir ao autómato os valores de configuração do posicionador de modo a permitir utilizar a configuração anterior. No entanto, se os sensores forem mudados de sítio podem levar a erros de posição bem como a colisões das óticas do laser PIV com a estrutura.

Para o controlo da velocidade houve necessidade de alterar as informações pedidas pela aplicação ao autómato, como o valor lido nas portas analógicas do autómato. Como a velocidade pode ser controlada de duas formas, manual, em que se insere a frequência desejada, ou automática, onde o utilizador insere uma velocidade desejada e o PID, que está configurado no autómato, irá atuar conforme o pedido. Houve então a necessidade de criar um mecanismo para a escolha, escolheu-se o “*radiobutton*” que foi configurado para apenas ser possível escolher um dos modos, manual ou automático. Consoante o modo escolhido, a memória de escrita muda bem como a memória usada para ativar o sistema. Na Figura 4.22 é possível verificar os “*radiobuttons*” bem como onde os valores da velocidade são demonstrados/alterados.

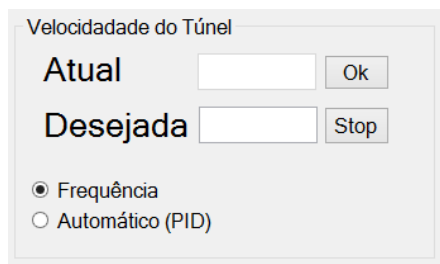


Figura 4.22 - Zona do controlo da Velocidade do escoamento to túnel de vento

Apesar de a aplicação estar a controlar todos os dispositivos disponíveis, esta não está concluída pois foi pedido que esta tenha a capacidade de guardar/ler dados de um documento de texto com as coordenadas do posicionador, bem como o tempo que terá de esperar entre ordens ou se o movimento é dado pelo utilizador, logo houve a necessidade de modificar novamente a aplicação. Assim, adicionou-se à mesma a capacidade de abrir ficheiros CSV (comma-separated values). Estes ficheiros são de texto mas com uma formatação que segue certas regras, todos os valores são separados por vírgulas ou outro carater especificado. Como na Europa para separar números com casas decimais usa-se a vírgula, o autor decidiu usar o ponto-vírgula como separação entre números. Então agora o utilizador tem a possibilidade de ler um ficheiro com várias posições para o eixo interno, bem como o tempo que o posicionador deve permanecer nessa mesma posição. Caso o utilizador não queira que seja a aplicação a mudar a posição, este indica tempo zero e a aplicação interpreta que a posição atual será mudada pelo utilizador. Outro ponto interessante para o utilizador é ter um registo da posição e da velocidade registada no mesmo. Para tal usando o mesmo método, gravou-se num ficheiro CSV a posição onde a sonda se encontra e o valor lido pela mesma. Caso a sonda inserida seja o tubo de Pitot, e este esteja ligado ao sensor de pressão, a aplicação recolhe o valor e grava. Caso se esteja a recorrer a outro método para medir a velocidade, surge uma caixa de texto a solicitar que seja inserido o valor.

No entanto, o utilizador pode não querer que o registo seja feito, para tal existe a opção de desligar a gravação automática. Uma das maneiras é de não a iniciar, para a mesma ser iniciada é necessário dizer o nome e o sítio onde se pretende gravar o ficheiro. Caso já se tenha iniciado, um botão irá surgir com a opção de desligar o sistema. De seguida é possível observar a aplicação gráfica final do sistema



Figura 4.23 - aplicação final

A aplicação toda está presente no Anexo A, este tem todos os menus bem como as ações que estes originam no programa

4.6 Resultados Finais

Uma vez resolvidos todos os sub-problemas anteriores, foi necessário testar todo o sistema como um só para garantir que o mesmo não continha erros. Erros provenientes de incompatibilidades de subsistemas, pedidos da mesma informação ao mesmo tempo ou da aplicação a requisitar informação de zonas diferentes ao mesmo tempo.

Para tal, ligou-se o programa e foram enviados os comandos para que os posicionadores se movimentassem em simultâneo, obrigando assim o programa a requisitar o movimento de dois posicionadores ao mesmo tempo bem como pedir valores de posição dos posicionadores alternadamente.

As seguintes imagens mostram algumas das posições do sistema em movimento. A Figura 4.24 mostra os posicionadores no zero (origem do referencial) do sistema e a Figura 4.25 está na posição 50 (meio do curso) de cada eixo, do interior e do exterior. A Figura 4.26 mostra todo o sistema nas posições máximas.

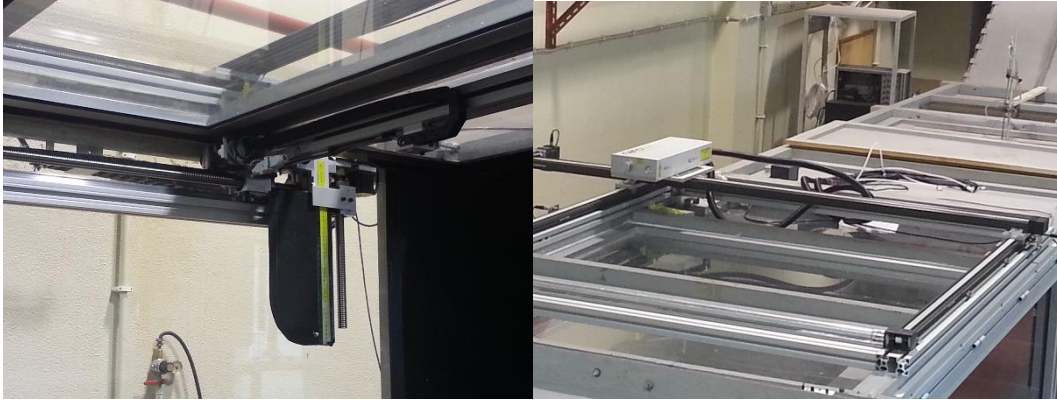


Figura 4.24 - Posição inicial de ambos os posicionadores



Figura 4.25 - Posição central dos posicionadores



Figura 4.26 - Posição máxima dos posicionadores

Como referido, foi adquirido material novo para acomodar todo este material, incluindo um quadro elétrico de dimensões maiores. Este novo quadro tem 80cm de comprimento, 80cm de altura e 20cm de profundidade. O aspeto final do mesmo pode ser visualizado na Figura 4.27



Figura 4.27 - Aspeto final do quadro elétrico

Dentro do possível, o mesmo foi organizado por zonas de controlo. A Figura 4.28 mostra as zonas definidas.

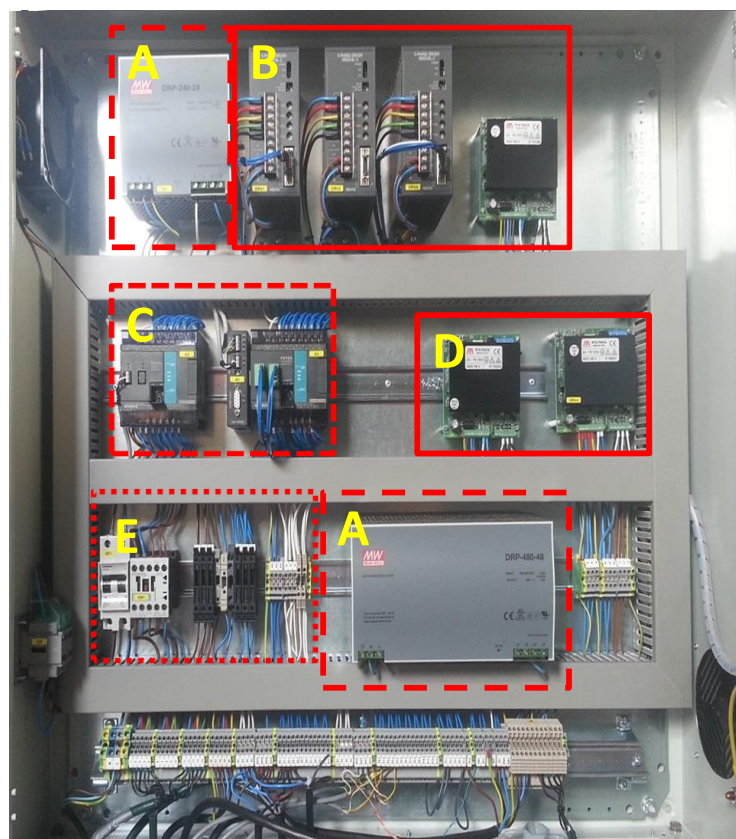


Figura 4.28 - Zonas do quadro elétrico

As zonas A e A1 são as fontes de alimentação do sistema. A fonte da zona A alimenta todos os sensores bem como o novo motor do eixo interno. Por sua vez, a fonte A1 foi instalada para alimentar os dois motores presentes no eixo superior. Devido à sua dimensão, esta não pôde ficar junto da outra fonte.

A zona B está associada ao eixo interno. Inicialmente estavam apenas presentes 3 *drives* que alimentavam os 3 motores do sistema de posicionamento interno. No entanto, o motor que estava associado à *drive* do meio avariou, como referido no sub-capítulo 4.2. Consequentemente, a mesma foi desativada e a *drive* mais à direita selecionada para desempenhar a sua função ou seja a de movimentar o eixo Y.

O grupo C corresponde à zona dos autómatos, onde estão presentes os dois autómatos sendo o primeiro a estação 3, responsável pelo eixo externo. O segundo autómato é responsável pelo controlo do posicionador interno e do variador de frequência, tendo também associado a si a carta analógica (no topo do mesmo) e a carta de comunicação.

A zona D é semelhante à zona B, no entanto esta controla o eixo superior, tendo 2 *drives* pois a mesma controla apenas dois eixos.

A zona E é a zona de segurança do sistema, onde estão presentes os fusíveis do sistema bem como os seus disjuntores. Quando é pressionado o botão de emergência, esta zona é responsável por desligar todo o quadro elétrico garantindo assim que o sistema não seja danificado ou não fira alguém.

Como é possível observar ainda existe espaço disponível no quadro elétrico para o caso de ser necessário expandir o sistema com mais *drives* ou outros aparelhos.

A Figura 4.29 contém a numeração atribuída a todos os componentes e a Tabela 4.6 descreve a função dos mesmos. O esquema elétrico pode ser observado no Anexo B.



Figura 4.29 - Numeração atribuída ao quadro elétrico

Tabela 4.6 - Material do quadro elétrico

Nome	Função
G1	Fonte de alimentação responsável pelo motor Eixo Interno Y e sensores do sistema
G2	Fonte de alimentação responsável pelos motores do Eixo externo X e Y
DRV1	Drive que controla o motor Interno do Eixo X
DRV2	Drive desativada
DRV3	Drive que controla o motor Interno do Eixo Z
DRV4	Drive que controla o motor Interno do Eixo Y
DRV5	Drive que controla o motor Externo do Eixo X
DRV6	Drive que controla o motor Externo do Eixo Y
A1	Autômato responsável pelo controlo do eixo interno e controlo do variador
A2	Carta de comunicação com RS232, RS485 e Ethernet
A3	Autômato responsável pelo controlo do eixo externo
QF1	Disjuntor do sistema
KML1	Contactora, responsável pelo corte da energia em caso de emergência ou caso o utilizador decida cortar a energia aos motores.
Fusíveis (F1 a F9)	Fusíveis responsáveis por manter a corrente para os motores dentro dos níveis aconselháveis, bem como regular a corrente para os sensores.

Estando o quadro finalizado, deu-se início ao desenho das placas *PCB's* para os circuitos do *joystick* e do sensor de pressão. Esta necessidade surgiu por ação da fragilidade das placas brancas onde os circuitos foram testados pois um pequeno toque pode dar origem a um mau contato. Desenharam-se as placas utilizando o programa EAGLE sendo que as mesmas foram feitas recorrendo a uma máquina CNC, presente no Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática. A Figura 4.30 e Figura 4.31 mostra as placas finais já impressas e com todos os componentes nas mesmas.

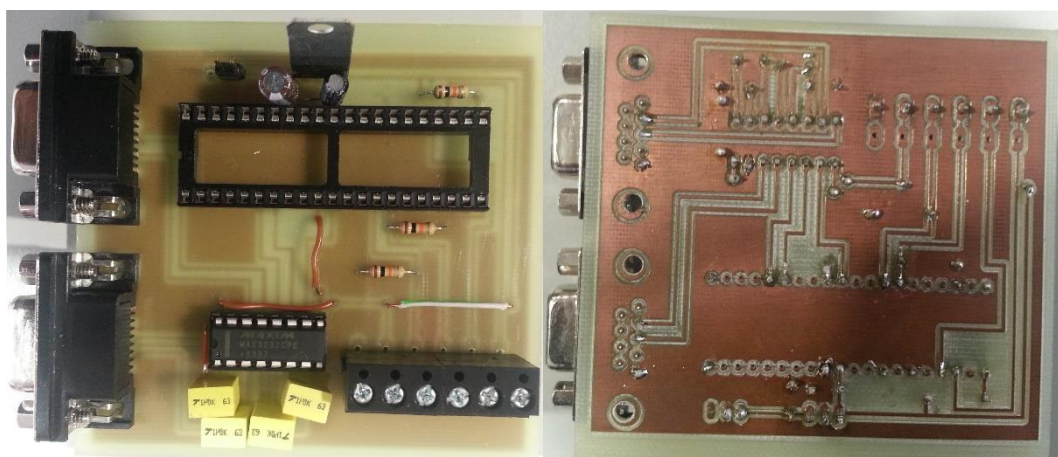


Figura 4.30 - Placa PCB do joystick

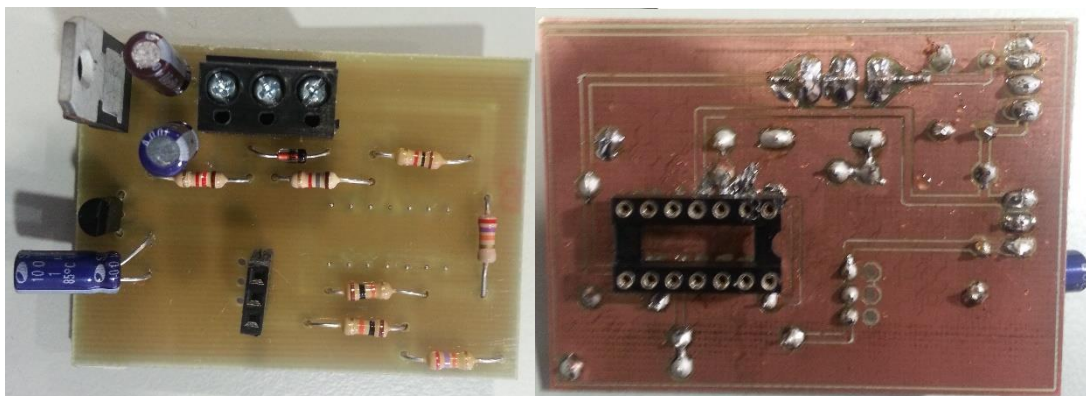


Figura 4.31 - Placa PCB de amplificação do sensor de pressão

5 Conclusões e trabalho futuro

Seguidamente é feita uma apreciação global do trabalho e apresentadas sugestões para alguns trabalhos futuros.

5.1 Conclusão

O sistema instalado permite ao utilizador controlar os dois posicionadores presentes no túnel. O sistema superior permite posicionar o laser do PIV ao longo da secção de testes do túnel. O sistema interno permite posicionar as sondas desejadas no interior do túnel e algumas maquetes. Foi também criado um sistema capaz de substituir o manómetro presente no túnel sendo que este novo sensor tem uma resolução superior ao antigo.

O novo sensor tendo uma resolução superior ao antigo, permitindo obter resultados mais precisos tanto na leitura dos dados como no controlo da velocidade do motor através do variador de frequência.

O atual sistema permite acoplar mais 3 motores caso surja tal necessidade, permitindo assim a capacidade de expansão do sistema, como por exemplo para uma garra a ser instalada no posicionador interno. Podem também ser adicionadas outras funções desde que as mesmas não usem mais de 3 motores de passo. No entanto com o sistema de comunicação atual, de *ModBus* por *Ethernet*, é possível adicionar facilmente mais autómatos ao sistema, o que permitirá controlar mais motores/sensores caso necessário. Com o sistema atual, basta adicionar autómatos com carta RS485 e configurá-los com a mesma velocidade do sistema, podendo serem logo integrados.

Como referido, no sistema atual existe um Pitot de referência, mas é possível usar outro sensor dentro do túnel, podendo este ser posicionado onde desejado pelo eixo interno. Ambos os valores estão a ser adquiridos e processados. O Pitot de referência controla a frequência do variador e o que se encontra dentro do túnel pode ser usado para obter valores junto da maquete presente no túnel de vento.

O sistema atual permite a recolha de dados automaticamente usando o segundo Pitot ou se se estiver a usar o anemómetro ou o FFID, estes valores podem ser introduzidos manualmente com o aparecimento de uma caixa de texto para o efeito. Estes valores são guardados num ficheiro para posterior uso/processamento. Também é guardada a posição de onde o valor foi obtido de modo a permitir que este possa ser confirmado.

O eixo superior foi dimensionado e instalado, permitindo prolongar a vida do laser PIV, pois a posição antiga de uso do mesmo levava a que este fosse danificado, sendo a nova a posição a óptima de uso do mesmo. Este foi testado no eixo superior e usado numa simulação apenas com o intuito

de verificar se todo o sistema estava bem configurado bem como permitir solucionar alguma falha do mesmo.

Posto isto, estando todos os objetivos alcançados, foi possível fazer uma melhoria ao túnel de vento, o que permitirá aos utilizadores do mesmo desempenhar as suas funções com mais facilidade e fluidez.

5.2 Trabalho futuro

Apesar de todos os objetivos cumpridos, poderiam ser implementadas mais algumas funções ao túnel de vento com o intuito de ajudar nos trabalhos realizados, como:

- Garra com 3 graus de liberdade. Esta permitiria posicionar sensores segundo o eixo necessário, isto é, ler a outra direção com o mesmo sensor do anemómetro (no caso dos sensores de um canal) ou as outras duas direções (no caso dos sensores de dois canais). Seria também possível posicionar tubos de Pitot, FFID e outros sensores que sejam adquiridos no futuro; o que poderia, por exemplo, ser útil para o estudo de turbinas eólicas, entre outros.
- Seria útil instalar uma mesa giratória que faria rodar as maquetes 360 graus, pois atualmente as maquetes testadas no túnel de vento têm uma dimensão considerável. Isto permitiria estudar o efeito dos escoamentos segundo várias direções sem a necessidade do utilizador ter que posicionar a maquete manualmente. Adicionalmente, isto garantiria máxima precisão na rotação da maquete para simular diferentes orientações do escoamento; o que seria uma mais-valia para o túnel de vento nos estudos de escoamento e dispersão em zonas urbanas.
- Numa perspetiva de encurtar a duração das experiências que envolvam medições com o PIV e com o anemómetro de fio quente e que, como referido anteriormente, utilizam os seus próprios programas, a aquisição de um computador com maiores capacidades seria significativamente vantajosa.

6 Referências

- Real Time Automation (2014). MODBUS RTU. Acedido a 17 fev. 2014. Disponível em <http://www.rtaautomation.com/wp-content/cache/supercache/www.rtaautomation.com/technologies/modbus-rtu/>.
- Borrego, C. (2003). Escoamento em Conduitas Fechadas. In *Mecânica de Flúidos* (pp. 162–183).
- Costa, M. J., Riethmuller, M. L., & Borrego, C. (1994). Wind-tunnel simulation of gas dispersion over complex terrain: Comparison of two length-scale studies. *Atmospheric Environment*, 28(11), 1933–1938. doi:10.1016/1352-2310(94)90333-6.
- Haber, R., Bars, R., & Schmitz, U. (2012). *Predictive Control in Process Engineering - From the Basics to the Applications* (p. 229). Wiley. Disponível em <http://books.google.pt/books?id=DAirdFRX0JYC>.
- National Instruments (2014). LabView. Acedido a 18 fev. 2014. Disponível em <http://www.ni.com/labview/why/pt/>.
- Jahanmiri, M. (2011). *Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications*. Chalmers University of Technology.
- Kulkarni, S. D., Minor, M. A., Deaver, M. W., Pardyjak, E. R., & Hollerbach, J. M. (2012). Design, Sensing, and Control of a Scaled Wind Tunnel for Atmospheric Display. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 17(4), 635–645. doi:10.1109/TMECH.2011.2113353.
- Lawyer, D. S. (2013). Appendix C: Serial Communications on EIA-232 (RS-232). Acedido a 2 abr. 2014. Disponível em <http://www.tldp.org/HOWTO/Text-Terminal-HOWTO-23.html>.
- Universal Flow Monitor, U. F. (2014). Thermal Flowmeter Technology. Acedido a 17 nov. 2014. Disponível em <http://www.flowmeters.com/thermal-technology>.
- Nasa. (2014). Wind Tunnel Downloads. Acedido a 19 fev. 2014. Disponível em <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/TunnelSim/index.htm>.
- Pereira, Ó. A. M. (2010). *Infra-estruturas eólicas: módulo autónomo de monitorização*. Universidade de Aveiro. Disponível em <http://hdl.handle.net/10773/5593>.
- Pinto, C. M. B. (2011). *Desenvolvimento de um indexer para comando XY de dois motores passo-a-passo*. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Disponível em <http://hdl.handle.net/10216/61666>.
- Santos, J. P. O. (2010). Apontamentos de Tecnologias de Accionamento e Comando. In *Apontamentos de Tecnologias de Accionamento e Comando* (pp. 100–113).
- Sensirion. (2014). Mass Flow Control with CMOSens. Acedido a 17 nov. 2014. Disponível em <http://www.sensirion.com/en/technology/gas-flow/>.

- Strangio, C. E. (1993). The RS232 STANDARD. Acedido a 2 abr. 2014. Disponível em http://www.camiresearch.com/Data_Com_Basics/RS232_standard.html#anchor1154232.
- Stricker, S. (2006). Modbus TCP class. Acedido a 25 mar. 2014. Disponível em <http://www.codeproject.com/Tips/16260/Modbus-TCP-class>.
- Tansley, C. E., & Marshall, D. P. (2001). Flow past a Cylinder on a β Plane, with Application to Gulf Stream Separation and the Antarctic Circumpolar Current. *Journal of Physical Oceanography*, 31(11), 3274–3283. doi:10.1175/1520-0485(2001)031<3274:FPACOA>2.0.CO;2.
- The Engineering ToolBox (2014). Pitot Tubes. Acedido a 16 nov. 2014. Disponível em http://www.engineeringtoolbox.com/pitot-tubes-d_612.html.

7 Anexos

Anexo A – Aplicação Gráfica



Figura 7.1 - Aplicação Principal



Figura 7.2 - Menu de opções "Ficheiro" ativo

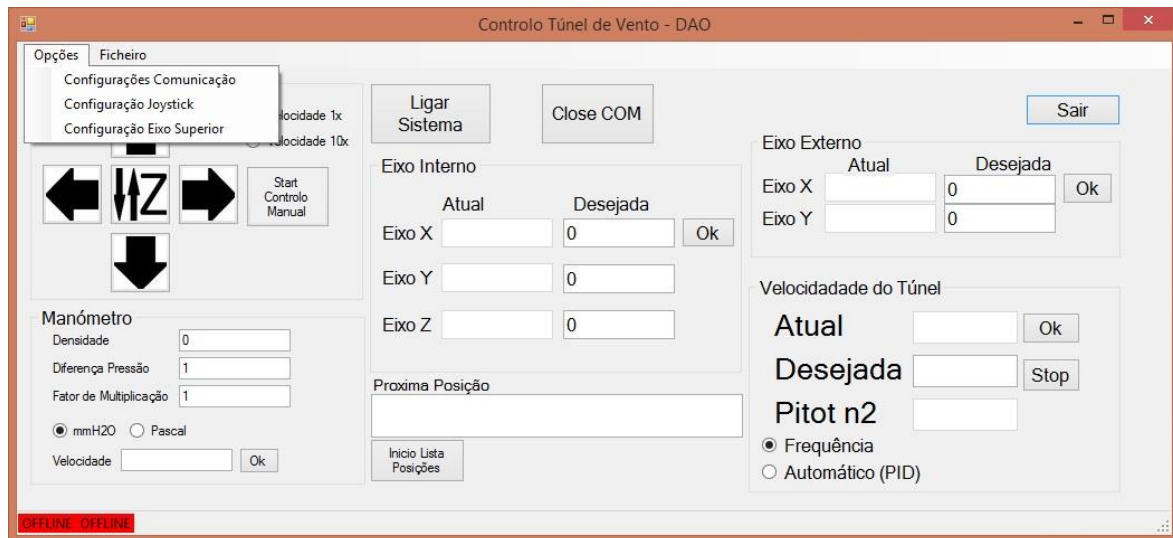


Figura 7.3 - Menu de opções "Opções" ativo

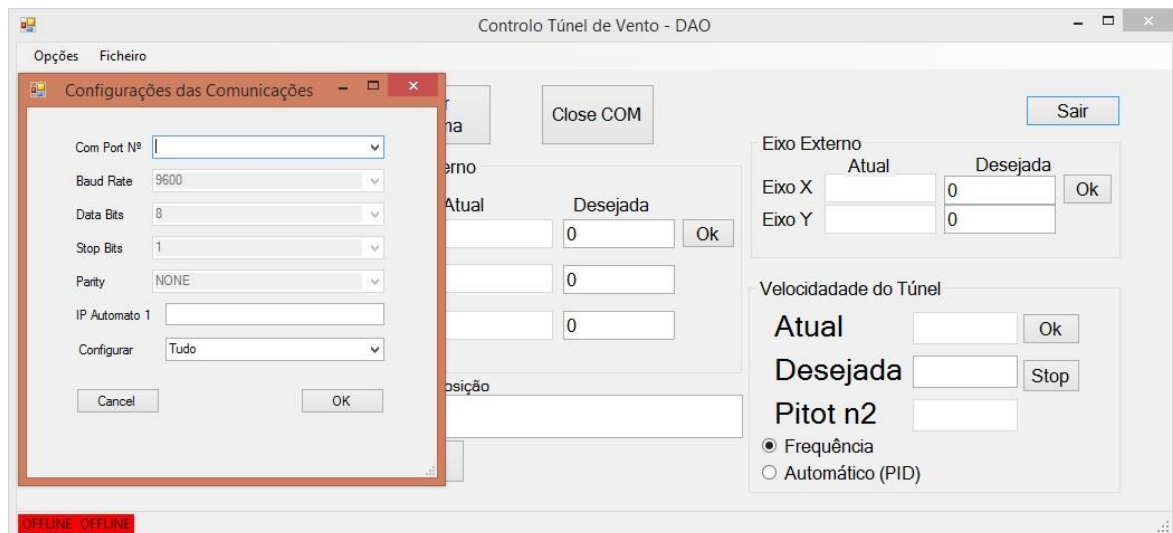


Figura 7.4 - Janela de configurações das comunicações ativa

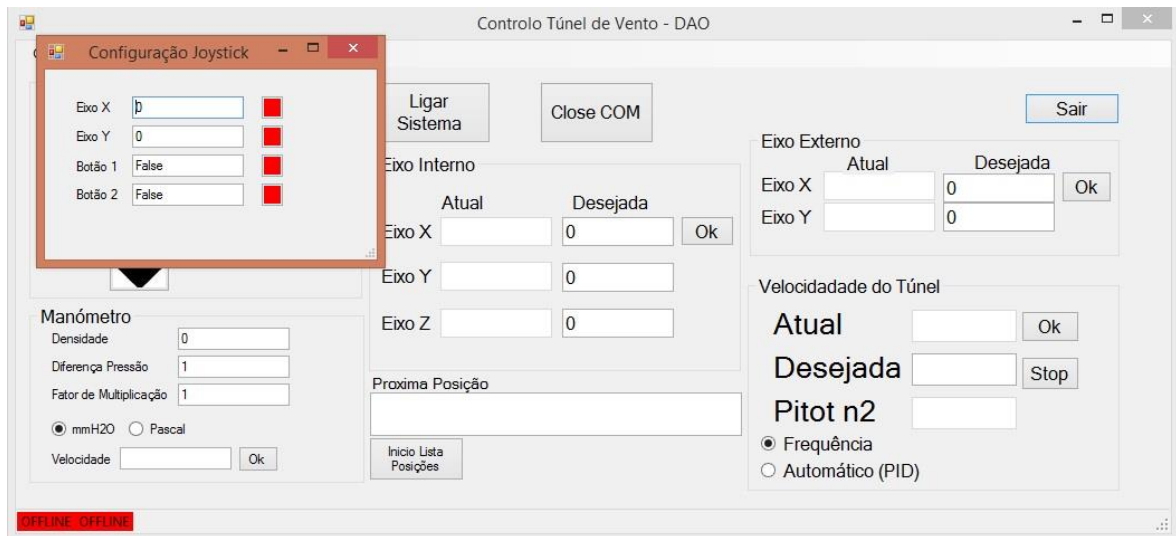


Figura 7.5 - Janela de configurações do joystick ativa

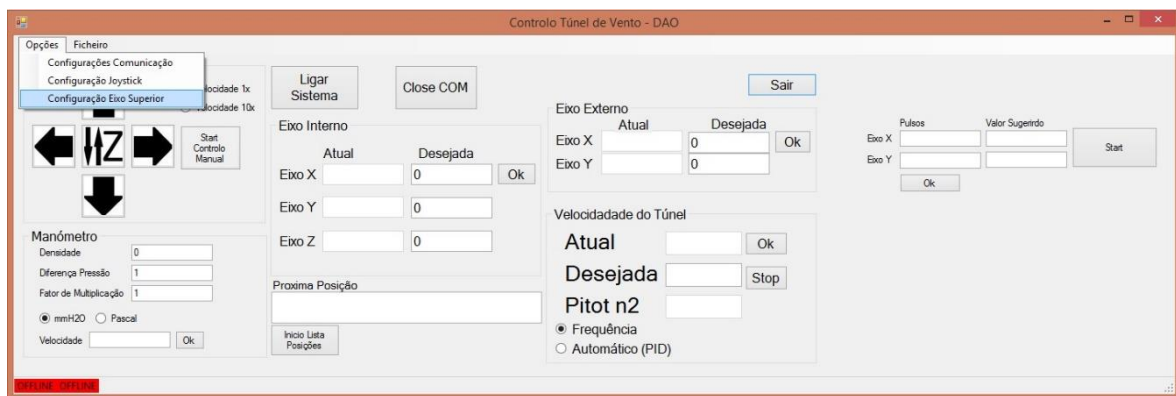
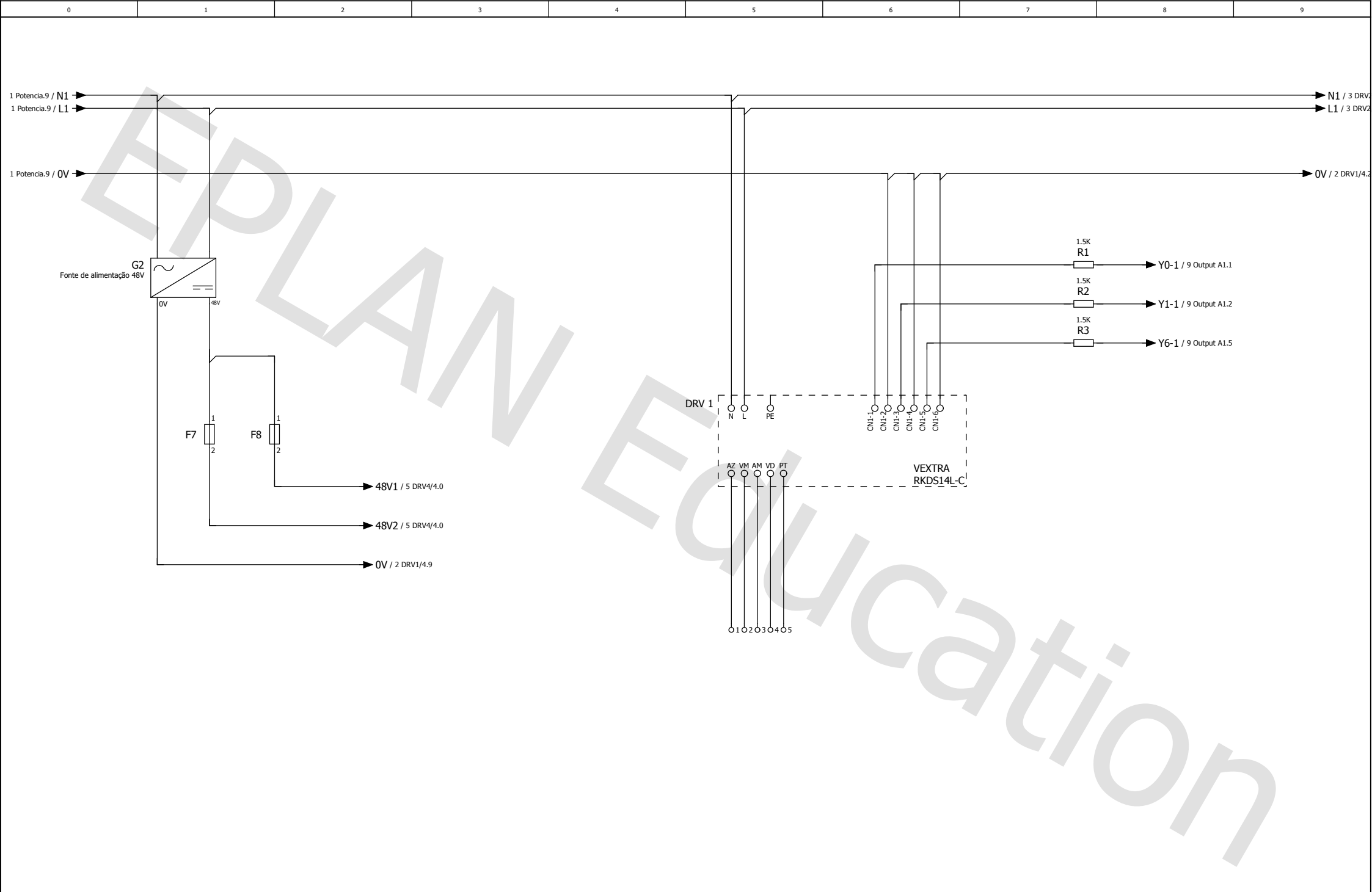
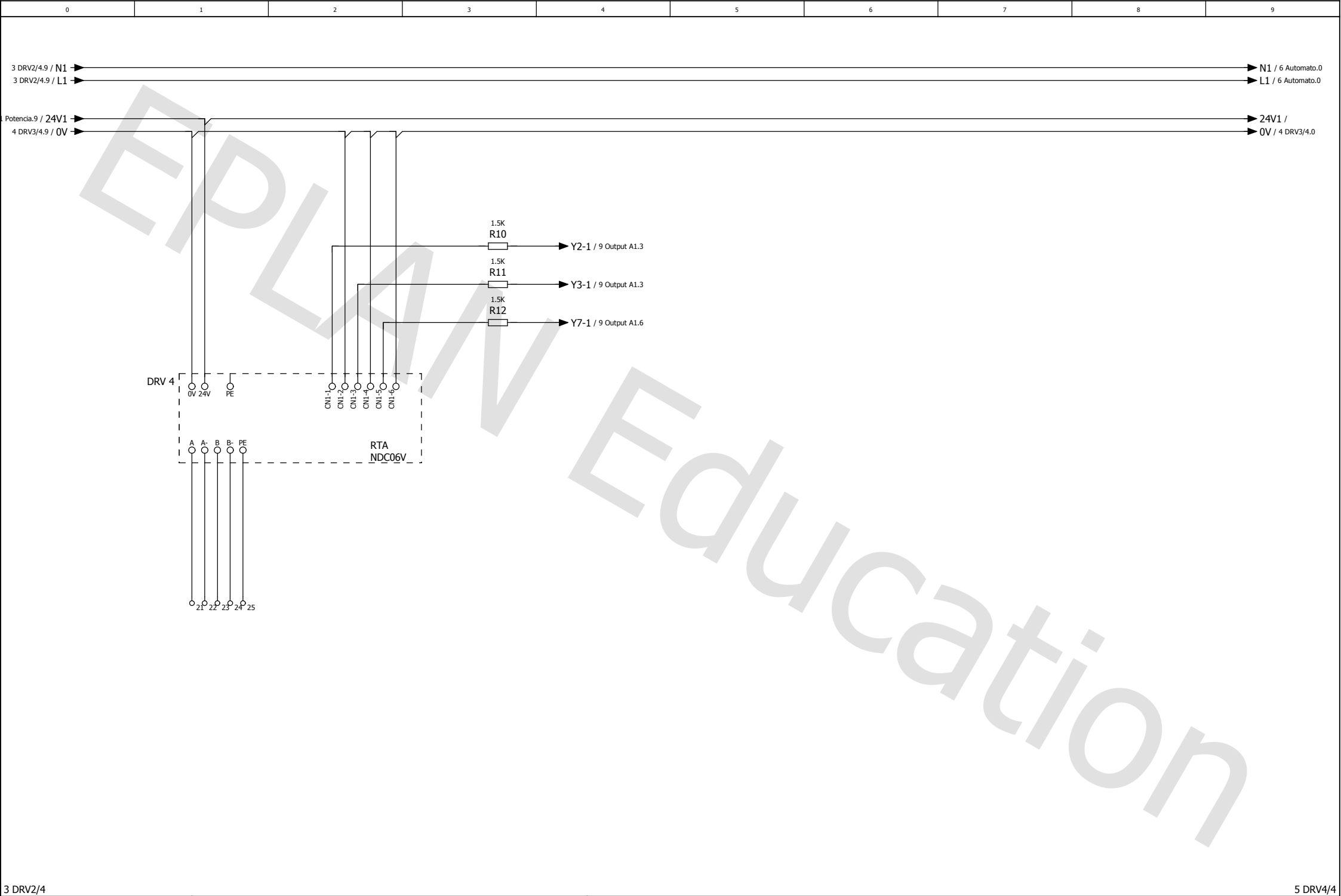
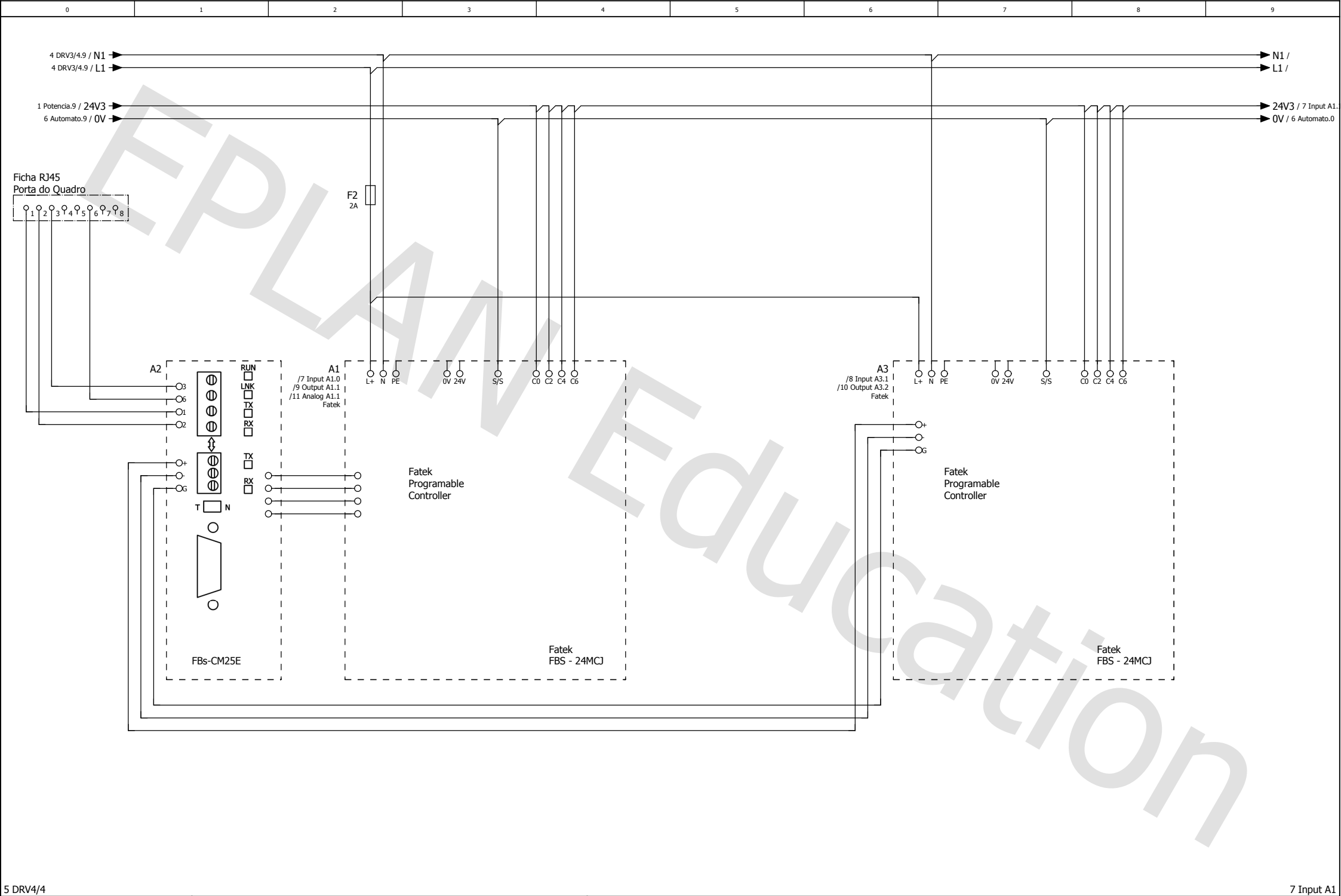


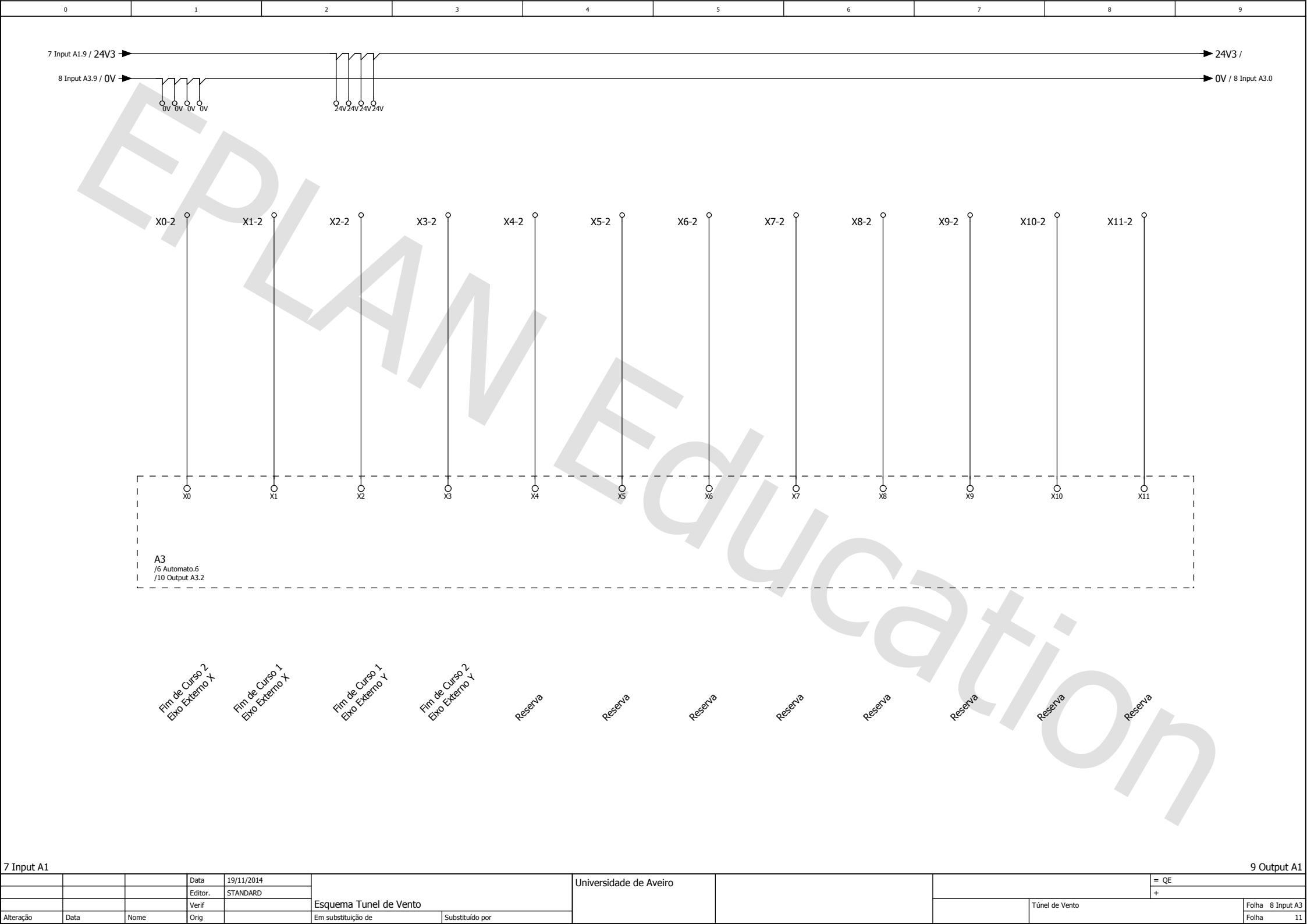
Figura 7.6 - Aplicação principal alterada com as "Configurações Eixo Superior"

Anexo B – Esquema elétrico

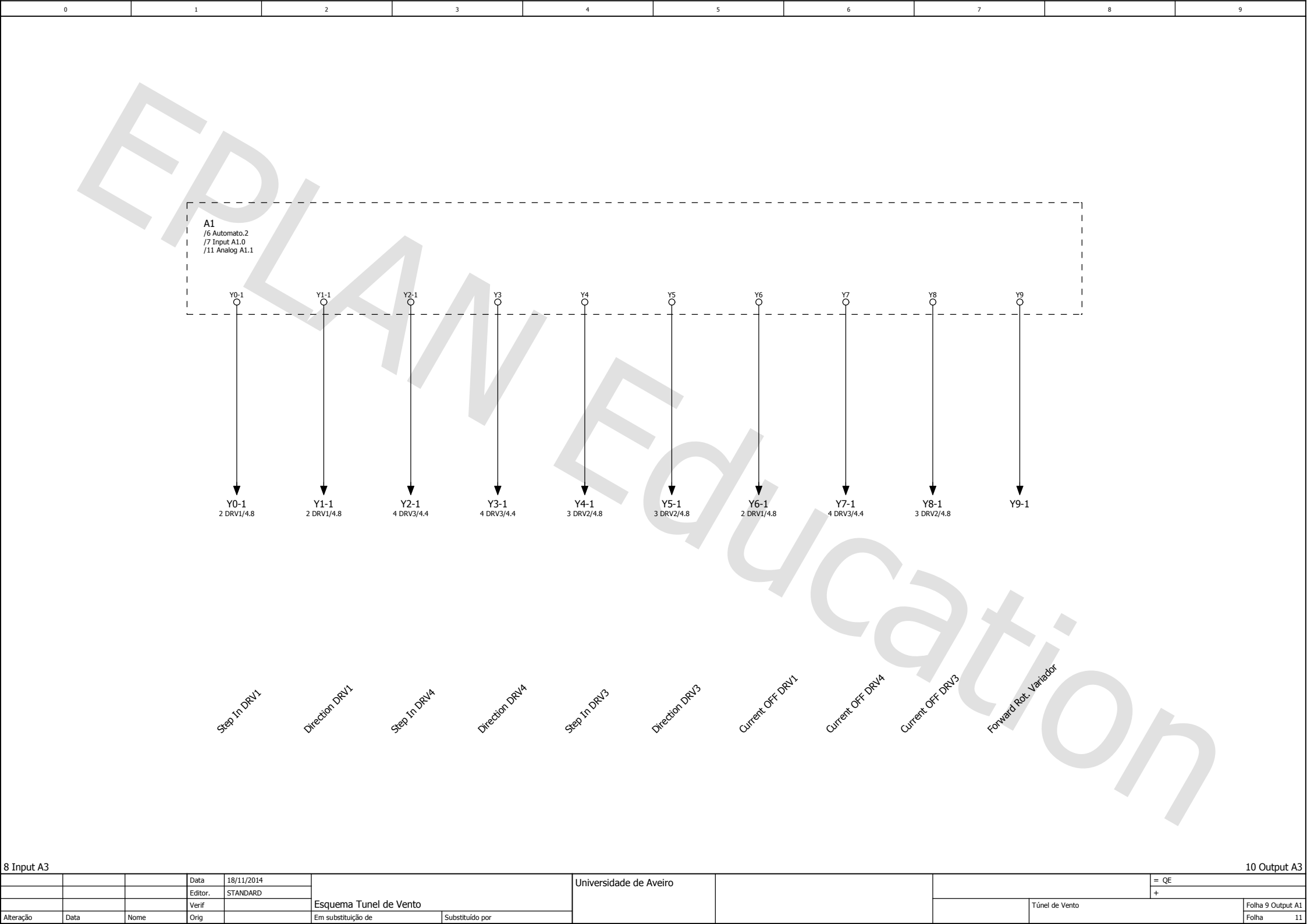


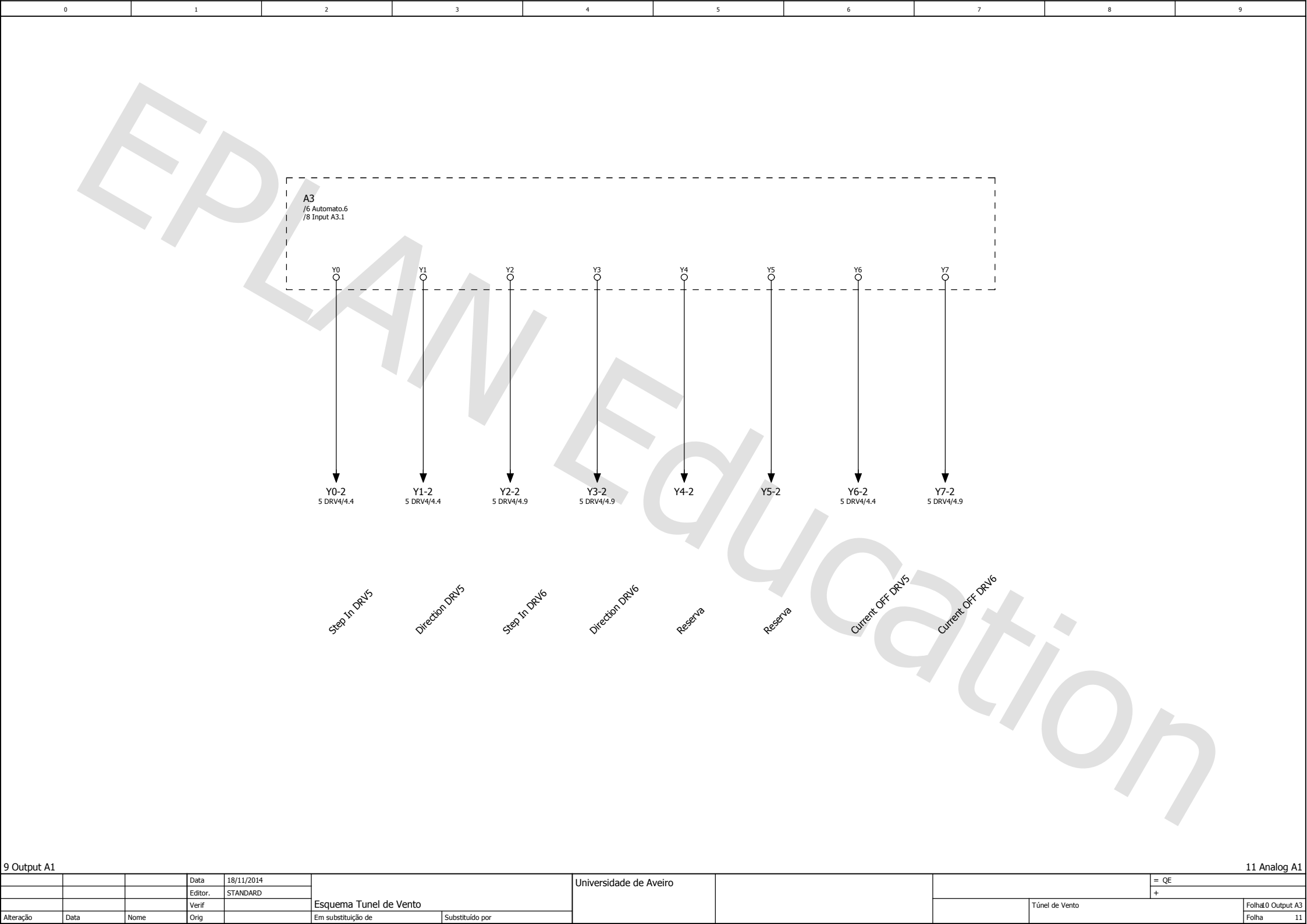


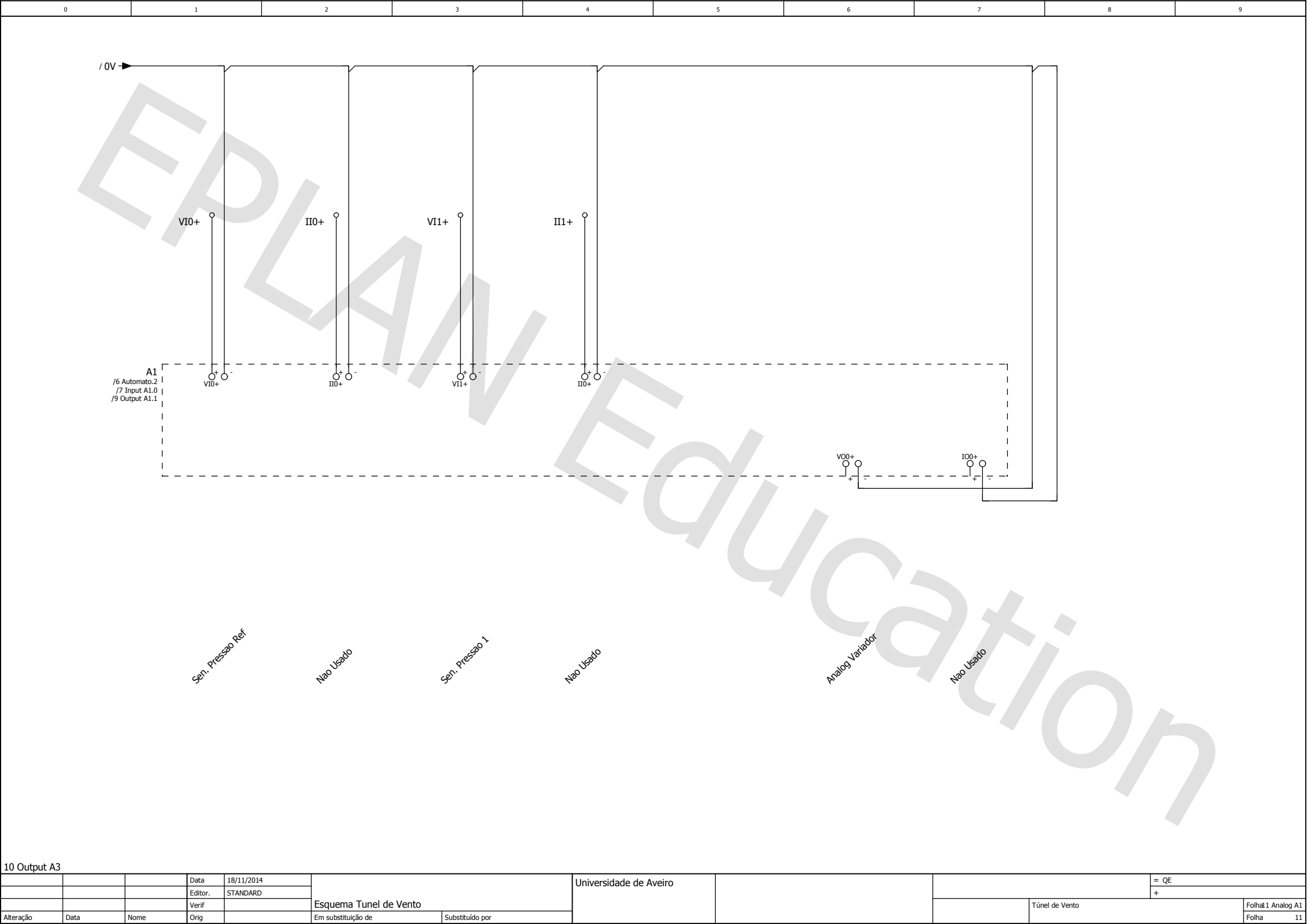




			Data	19/11/2014	Universidade de Aveiro		= QE		Folha 8 Input A3	
			Editor.	STANDARD						
			Verif							
Alteração	Data	Nome	Orig		Em substituição de	Substituído por	Túnel de Vento		Folha 11	







10 Output A3

			Data	18/11/2014	Universidade de Aveiro				= QE		Folha1 Analog A1
			Editor.	STANDARD					+		Folha
			Verif								11
Alteração	Data	Nome	Orig		Em substituição de	Substituído por			Túnel de Vento		